

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Ověření vlastností alkalicky aktivovaných systémů v závislosti na
zvoleném typu plniva

Properties of alkali-activated systems according
to the type of filler

Student:

Petr Závorský

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Boháčová

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Závorský**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb**
Téma: **Ověření vlastností alkalicky aktivovaných systémů v závislosti na zvoleném typu plniva**
Properties of alkali-activated systems according to the type of filler

Zásady pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce je ověření základních fyzikálně-mechanických vlastností alkalicky aktivovaných systémů připravených na bázi rozdílných plniv (popílky, strusky, metakaoliny) a jejich zhodnocení pro možné aplikace v jednotlivých stavebních odvětvích.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČESKÁ ROZVOJOVÁ AGENTURA, O.P.S.: *Současný stav výzkumu v oblasti geopolymérů*. 2005, 285 s.
ŠKVÁRA, F.: *Alkalicky aktivované materiály - geopolymery*. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1.
Dostupné z: <http://www.vscht.cz>. VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky.
VLČEK, J.: *Materiálové využití strusek z metalurgie železa a oceli metodou alkalické aktivace*. Ostrava, 2008. Habilitační práce. VŠB-TUO, FMMI.
WANG, S. D., PU, X. C., SCRIVENER, K. L., PRATT, P. L.: *Alkali-Activated Slag Cement and Concrete*.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Boháčová**

Datum zadání: 31.10.2013

Datum odevzdání: 05.05.2014


Ing. Libor Židek
vedoucí katedry




prof. Ing. Darja Kubečková, Ph.D.
děkanka fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne.....

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

ZÁVRSKÝ, P. *Ověření vlastností alkalicky aktivovaných systémů v závislosti na zvoleném typu pojiva*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.

Alkalicky aktivované systémy se řadí do rozsáhlé skupiny anorganických pojiv. Značí se velkým energetickým a ekologickým potenciálem. Jsou to materiály vzniklé alkalickou aktivací a následnou polykondenzací. Tyto systémy představují pro současné stavebnictví relativně nový typ materiálů.

Hlavním cílem této práce bylo stanovení základních vlastností alkalicky aktivovaných materiálů v závislosti na zvoleném typu pojiva.

V rámci experimentu byly nejprve vyhodnoceny vlastnosti čerstvých směsí, v další části byl ověřován vliv proteplování na základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vyrobených těles a také na mrazuvzdornost připravených materiálů.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo u kompozitů připravených na bázi vysokopecní granulové strusky, výzkumem byl potvrzen také pozitivní vliv proteplování na počáteční pevnosti připravených prvků.

Klíčová slova: alkalicky aktivovaný, vysokopecní granulovaná struska, popílek, metakaolin, aktivátor.

Annotation

ZÁVRSKÝ, P. *Properties of alkali-activated systems according to the type of filler*. Ostrava, 2014. *Bachelor's thesis*. VŠB – Technická univerzita Ostrava.

Alkali-activated systems belong to a large group of inorganic binders. These are characterized by the large energy and environmental potential. These materials are produced by alkaline activation and subsequent polycondensation. These systems represent the nowadays relatively new type of construction materials.

The main objective of this work was to determine the basic properties of alkali-activated materials depending on the type of binder.

In the experiment were first evaluated the properties of fresh mixture, the next section was focused on the impact of tempering on basic physical and mechanical properties of products and the frost resistance of the prepared materials.

The best results were achieved by composites prepared on the basis of granulated blast furnace slag, research has confirmed a positive effect of tempering on the initial strength of prepared elements.

Keywords: alkali-activated, granulated blast furnace slag, ash, metakaolin, activator.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Alkalicky aktivované materiály	11
2.1 Portlandský cement versus alkalicky aktivovaný materiál	11
2.2 Reakční mechanismus alkalické aktivace	12
3. Historie a současnost alkalicky aktivovaných systémů.....	13
3.1 Mezopotámie	13
3.2 Egypt	13
3.3 Výzkum ve 20. století.....	14
3.4 Výzkum v ČR a současnost.....	15
4. Suroviny pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů	17
4.1 Popílky:	17
4.2 Metakaolin.....	19
4.3 Strusky.....	20
4.3.1 Vysokopecní granulovaná struska (VGS)	21
4.3.2 Ocelářská struska.....	23
4.4 Aktivátory	23
4.4.1 Vodní sklo:	24
4.4.2 Hydroxidy.....	25
5. Praktická část.....	26
5.1 Cíl práce	26
5.2 Specifikace vstupních surovin.....	26
5.2.1 Popílek.....	27
5.2.2 Metakaoliny.....	27
5.2.3 Vysokopecní granulovaná struska	28
5.2.4 Normový písek	29

5.2.5 Aktivátor.....	29
5.3 Metodika zkoušení	30
5.4 Příprava receptur	30
5.4.1 Míchání směsí	30
5.4.2 Zhotovení těles pro zkoušení.....	31
5.4.3 Uložení zkušebních těles	32
5.5 Zkoušení	32
5.5.1 Zkouška konzistence	32
5.5.2 Stanovení dob tuhnutí.....	33
5.5.3 Stanovení objemové hmotnosti	34
5.5.4 Pevnost v tahu za ohybu.....	35
5.5.5 Pevnost v tlaku	36
5.5.6 Zkouška mrazuvzdornosti	37
5.6 Vyhodnocení zkoušek vlastností alkalicky aktivovaných systémů.....	39
5.7 Hodnocení výsledků čerstvých alkalicky aktivovaných materiálů	40
5.7.1 Konzistence čerstvých směsí.....	40
5.7.2 Stanovení dob tuhnutí.....	41
5.8 Hodnocení výsledků ztvrdlých alkalicky aktivovaných materiálů.....	42
5.8.1 Stanovení objemové hmotnosti	43
5.8.2 Pevnosti neproteplováných vzorků po 1 dnu	44
5.8.3 Pevnosti proteplováných vzorků po 1 dni	45
5.8.4 Pevnosti neproteplováných vzorků po 7 dnech.....	46
5.8.5 Pevnosti proteplováných vzorků po 7 dnech.....	49
5.8.6 Pevnosti neproteplováných směsí po 28 dnech.....	52
5.8.7 Pevnosti proteplováných vzorků po 28 dnech.....	55
5.8.8 Mrazuvzdornost.....	59
5.9 Vyhodnocení výsledků a možné uplatnění ve stavebnictví	62

5.9.1 Nárůst pevností v tlaku u neproteplovaných vzorků	62
5.9.2 Vývoj pevností v tlaku u proteplovaných vzorků	64
5.9.3 Nárůst pevností v tahu za ohybu u neproteplovaných vzorků	66
5.9.4 Nárůst pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu	69
5.9.5 Grafické porovnání pevností v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání	71
5.9.6 Grafické porovnání pevností v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání	74
5.9.7 Porovnání pevností v tahu za ohybu	77
5.9.8 Porovnání pevností v tlaku	78
5.9.9 Možná uplatnění připravených receptur ve stavebnictví	80
6. Závěr	81
7. Poděkování	82
8. Použitá literatura	83
9. Seznam obrázků	86
10. Seznam tabulek	89
11. Seznam příloh	91

1. Úvod

Alkalicky aktivované materiály představují pojiva, která vznikají alkalickou aktivací latentně hydraulických látek. Latentně hydraulické látky jsou zastoupeny zejména druhotnými surovinami, přičemž je v dnešní době využívání takto vzniklých odpadů věnována zvýšená pozornost. [1]

Obecně se předpokládá, že by v budoucnu alkalicky aktivované systémy mohly alespoň z části nahradit výrobky obsahující cement. Při výrobě těchto kompozitů totiž dochází k menší zátěži životního prostředí. [1]

Alkalicky aktivované materiály mají přibližně stejné mechanické vlastnosti jako výrobky na bázi cementu. Příznivé je v případě průmyslové výroby i ekonomické hledisko.[1]

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo stanovení základních vlastností alkalicky aktivovaných materiálů v závislosti na zvoleném typu pojiva. Součástí předkládané práce je rovněž stručný přehled vývoje alkalicky aktivovaných systémů formou rešerše.

Praktická část probíhala ve třech etapách. První část experimentu představovala přípravu receptur a ověření vlastností čerstvých směsí. Stanoveny byly konzistence a počátky a konce doby tuhnutí. Druhá fáze proběhla již na ztvrdlých vzorcích, přičemž se výzkum zaměřil na ověření vlastností proteplováných a neproteplováných těles. V této části experimentu byly zjišťovány pevnosti v tlaku a tahu ohybem, objemové hmotnosti a mrazuvzdornost připravených kompozitů. Třetí fáze práce je věnována vyhodnocení naměřených výsledků.

Jako základní složky připravovaných směsí byly v práci použity metakaoliny I-META 4 a N-META 4 z produkce firmy Sedlecký kaolin, a.s., vysokopecní granulovaná struska firmy Kotouč Štamberk, s.r.o. a popílek z elektrárny Dětmarovice. Jako aktivátor latentně hydraulických vlastností bylo použito vodní sklo Kittfort upravené roztokem hydroxidu sodného. Plnivem byl normový písek frakce 0/2 mm.

Tato práce zhodnotila vlastnosti alkalicky aktivovaných systémů připravených na bázi rozdílných pojiv. Z naměřených výsledků je také možno sledovat vliv silikátového modulu aktivátoru a rovněž vliv proteplování na konečné vlastnosti kompozitů připravených z jednotlivých pojiv.

2. Alkalicky aktivované materiály

Systémy syntetizované alkalickou aktivací představují pro současné stavebnictví relativně nový typ materiálů. Alkalicky aktivované kompozity jsou materiály na rozhraní keramických či skelných materiálů a klasických hydratovaných anorganických pojiv. [10]

Výrobní suroviny jsou především odpadního charakteru, zejména elektrárenské popílky a strusky z metalurgických procesů. Dalšími surovinami mohou být také přírodní materiály, například jíly a kaolíny. K alkalické reakci dochází již při běžných laboratorních podmínkách, za zvýšených teplot a tlaku jsou konečné produkty odlišné. [10]

Alkalicky aktivované materiály představují dvousložkové pojivové systémy. První složku tvoří aluminosilikát, nejčastěji vysokopeční struska, popílek nebo metakaolin a druhou složkou je alkalický aktivátor. Výsledné produkty alkalické aktivace lze označit jako „umělý kámen“. Produkty alkalické aktivace obsahují jak zeolitické, tak C-S-H fáze, a to v závislosti na obsahu CaO a skelné fáze Si_2O ve vstupních surovinách a také na podmínkách okolního prostředí. [1]

Alkalicky aktivované systémy se řadí do rozsáhlé skupiny anorganických pojiv. Značí se velkým energetickým a ekologickým potenciálem. [23] Jsou to materiály vzniklé alkalickou aktivací a následnou polykondenzací. Strukturu tvoří vhodně kombinované tetraedry s atomy kyslíku, hliníku a křemíku. Chemickým složením se podobají zeolitům. Jejich mikrostruktura je ovlivněna molárním poměrem Na(K) : Si : Al vzniklého kompozitu. Materiály tohoto typu jsou podobné keramice, která ovšem vzniká za vysokých teplot. [1, 8]

2.1 Portlandský cement versus alkalicky aktivovaný materiál

Nejpoužívanějším hydraulickým pojivem je v současném stavebnictví portlandský cement. Cement je z vápence vyráběn složitým a energeticky náročným procesem. [1]

V posledních letech jsou kladeny požadavky na šetrné využití přírodních zdrojů a recyklaci odpadů. Zejména se jedná o využívání druhotných surovin z průmyslové výroby.

Tyto materiály se v současnosti běžně využívají jako příměs do cementu a tímto snižují množství surovin pro jeho výrobu.[18]

Alkalicky aktivované materiály v mnoha ohledech předčí klasické cementové betony. Tyto systémy se vyznačují vysokou pevností, odolností proti působení agresivních látek a odolností vůči působení vyšších teplot. Jsou to systémy se značným potenciálem a velkým rozsahem možného využití. [18]

2.2 Reakční mechanismus alkalické aktivace

Hydratační procesy nejsou dosud zcela přesně objasněny. Průzkumy ukazují, že se vlastnosti konečného produktu alkalické aktivace významně liší nejen v závislosti na použitém alkalickém aktivátoru a primárním materiálu, ale také v závislosti na podmínkách okolního prostředí, a to zejména na teplotě a tlaku. [17]

Podle Glukovského je proces hydratace složen ze spojených reakcí. Reakce zahrnují rozklad primárního materiálu do nízko stabilních jednotek s koagulačními strukturami a vytvoření kondenzačních struktur. První krok se skládá z rozrušení kovalentních vazeb Si-O-Si a Al-O-Si, v silně alkalickém prostředí. Toto rozrušení nastává za zvýšeného pH >12. Další část tvoří sjednocení rozrušených produktů a následné vytvoření nové koagulační struktury. Vytvoření koagulační struktury vede k poslední fázi vytvoření kondenzované struktury. [17]

3. Historie a současnost alkalicky aktivovaných systémů

První použití alkalicky aktivovaných materiálů pravděpodobně spadá již do starověku. Podle Davidovitse z vyslovené hypotézy při stavění starověkých staveb na bázi geopolymerních pojiv. Tyto úvahy jsou dnes studiem analýz. [24]

3.1 Mezopotámie

Mezi řekami Eufrat a Tigris na území dnešního Iráku se začala formovat od třetího tisíciletí nová vyspělá kultura. Střetly se zde dva odlišné národy. Na území existoval důmyslný urbanismus. Nejvýznamnější dochované stavby jsou hradby, cimbuří a stavba zikkuraty. Ke stavebním účelům patřily zejména cihly, jejichž vynález je připisován Sumerům. Cihelná stavba zikkuratu v Uru je pět tisíc let stará a životnost cihly je obdivuhodná. Cihly nesou charakteristické znaky keramického střepu, ale teplota výpalu 1000°C je nepředstavitelná z hlediska tehdejšího nedostatku surovin. Další možností je výpalem pomocí ropy, ale struktura cihel nenaznačuje známky výpalu. [10]

Důležitým aspektem k zamyšlení je fakt, že Sumerové ovládali chemické procesy. Vzorky jsou analyzovány a nesou známky amorfni a vláknité silikátové struktury. Tyto vzorky jsou důkazem, že byly aglomerovány chemickou syntézou podobně jako geopolymerní materiály. [10]

3.2 Egypt

Egyptská civilizace podle důkazů znala technologii polymerů. Cheopsova pyramida, sestavená z 2,6 miliónů bloků kamene vážících přibližně 5,5 miliónů tun, je nejobtímnější

stavbou a představuje vrchol egyptského stavitelství. Výška pyramidy podle odhadů dosahovala 147 m. [7]

Váha kamenných bloků poukazuje na fakt, že staří Egyptané by bez znalosti kola k vyzdvižení takových bloků potřebovali dva tisíce lidí. Během dvaceti let dílo za vlády faraona mělo být postaveno. Podle časového vycházení se každý den muselo osadit 400 kvádrů, což je při hypotéze tehdejšího tradičního způsobu výstavby zcela nereálné. [10]

Pyramidy a chrámy, jak se předpokládá podle teorie Davidovitse, byly zkonstruovány pomocí aglomerovaného vápence. Pyramidy sestavené z bloků tvořil měkký vápenec těžený v dolech. Tento vápenec byl nadále rozmělněn vodou, aby vytvořil vápencovou kaši, která se dala přenášet v koších. Vápencová kaše tvořená dalšími přísadami, jako je kaolin, natron a vápno, pak dle teorie byla napěchována, nalita nebo stlačena do forem přímo na místě tak jako dnešní beton. [7]

Teorii vyslovené Davidovitsem nahrávají i fakta z poznatků archeologů. Stavební bloky pyramid obsahovaly podle rentgenového měření aluminosilikátové látky potřebné pro vznik geopolymerních materiálů. [10] Měření také prokázalo rozdíly v hustotě bloků. Výsledky měření udávají 20 % rozdíly ve srovnání s místním hutnějším vápencem, přičemž nižší hustota je důsledkem aglomerace. Pěchované bloky mají vždy o 20 % menší hustotu než přírodní kámen. [7]

3.3 Výzkum ve 20. století

První záznamy o zreagování alkálií s jílem jsou v letech 1934. K této reakci došlo v keramickém závodě firmy Olsen. Znovuobjevení této reakce přišlo o čtyřicet let později týmem ruských vědců Berg & al. v roce 1970. Tato reakce však neměla úspěšné pokračování v zavedení do průmyslové výroby. [10]

Od 70. let 20. století probíhá rozsáhlý výzkum alkalicky aktivovaných materiálů. [1] Roku 1969 byl získán první patent na přípravu geopolymérů profesorem Gluchovským z Ukrajiny. Gluchovský konečné produkty alkalické aktivace označoval pojmem „gruntocementy“. Výzkum na Ukrajině vedl na základě slibných výsledků a k řadě

průmyslových aplikací. Tyto se zabývaly alkalickou aktivací aluminosilikátů odpadního charakteru, a to především strusek z ocelářské výroby. [10]

Další významný vývoj v oblasti geopolymérů zaznamenal Davidovits, který jako první použil pojem „geopolymer“. [10] Považuje se za objevitele geopolymérizace. Dle jeho striktní definice pojem geopolymer vyhovuje pouze látkám vzniklým alkalickou aktivací čistého metakaolinu. Materiály vyhovující této definici mohou být označovány jako geopolymer, přičemž všechny ostatní jen a pouze alkalicky aktivovanými materiály bez ohledu na použité pojivo.[23]

Roku 1983 byl vyvinut americkou společností Pyrament první vysoce pevný geopolymerní beton. Tento beton byl vytvořen na bázi geopolymerních a hydraulických cementů. Přidáním mleté vysokopevní strusky, popílku a metakaolinu k portlandskému cementu za působení uhličitanu draselného vzniká směs, která již po velmi krátké době zraje a vykazuje vysoké pevnosti. Tento beton se používá pro opravy runway a dálnic. [10]

3.4 Výzkum v ČR a současnost

V ČR se geopolymery zabývá mnoho laboratoří od roku 1973. Průmysl v ČR spojený s těžbou surovin vytvořil od počátku 19. století značnou část průmyslových odpadů. Z těchto odpadů mají nejvýznamnější podíl popílků vznikající při spalování pevných paliv, proto je značná část výzkumu v rámci ČR zaměřena právě na možnosti využití této suroviny v alkalicky aktivovaných systémech. [10]

Aktivity Ústavu skla a keramiky Vysoké školy chemicko-technologické v Praze ve spolupráci s fakultou stavební jsou pod vedením Škváry dlouhodobě věnovány výzkumu alkalicky aktivovaných materiálů. V současné době je výzkum zaměřen především na aluminosilikátové polymerní materiály na bázi popílků, strusek a jílových minerálů, pojiva vyrobitelná bez emisí CO₂, keramické materiály na bázi aluminosilikátových polymerů a fixací těžkých kovů z průmyslových odpadů v matici geopolymerních materiálů. [26]

V rámci VŠB - TUO řeší problematiku alkalicky aktivovaných pojivových systémů několik fakult. Výzkumná činnost Ústavu průmyslové keramiky na FMMI VŠB - TUO je

zaměřená na vývoj nových možností enviromentálního zpracování hutních odpadů a recyklace druhotných surovin, dále také zkoumá vliv fázového složení a mikrostruktury na funkční vlastnosti geopolymerních materiálů z technogenních pucolánů. [1, 25] V rámci katedry stavebních hmot a diagnostiky staveb na FAST VŠB - TUO je výzkum geopolymérů zaměřen na přípravu vysokopevnostních lisovaných alkalicky aktivovaných systémů, přípravu nových tepelně-izolačních materiálů na bázi alkalické aktivace, ověřování vlivu různých typů aktivátorů na konečné vlastnosti připravených materiálů aj.

Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i. se zabývá nevyužívanými zásobami kvalitních jíílů. Řeší možnosti jeho uplatnění ve sférách, v nichž nelze použít cement kvůli vysokým teplotám. [10, 1]

Problematikou odpadů a možnostmi jejich využití se zabývá řada týmů, ať už soukromých firem, nebo vysokých škol. Jedná se zejména o VUT v Brně, Českou rozvojovou agenturu, o.p.s., Výzkumný ústav anorganické chemie a.s. v Ústí nad Labem, atd. [1, 18]

4. Suroviny pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů

Při výrobě alkalicky aktivovaných materiálů se jako pojiva uplatňují zejména odpadní suroviny z různých průmyslových odvětví, řadí se zde zejména vysokopecní granulovaná struska a elektrárenské popílků. Jedná se o latentně hydraulické látky, které potřebují určité množství alkalického aktivátoru pro vybuzení hydraulických vlastností. [1] Jsou to suroviny s vysokým podílem aktivních oxidů SiO_2 a Al_2O_3 . [12]

Materiálů, u kterých je možné alkalickou aktivací nastartovat hydratační procesy, je velké množství. Dosud provedené výzkumy se zabývaly aktivací zejména:

- Popílků
- Metakaolinu
- Strusek
- Mikrosiliky
- Červeného bláta
- Nekalcinovaných jílu
- Jemně mletého skla [17]

V následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány suroviny používané pro alkalickou aktivaci nejčastěji. Jsou zde popsány rovněž nejčastěji používané alkalické aktivátory.

4.1 Popílků:

Jedná se o odpadní látky z energetického průmyslu. Produkce popílku se neustále zvyšuje v důsledku nárůstu spotřeby elektrické energie. Elektrická energie se celosvětově vyrábí spalováním fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn). [13]

Popílek je heterogenní materiál vznikající spalováním tuhých paliv zpravidla v jemně mletém stavu. Popílků jsou zachycovány z kouřových plynů v odlučovačích elektráren nebo

tepláren. V dnešní době je snaha o co nejúčinnější zachytávání popílku z důvodu ochrany životního prostředí. [14]

Zachycování popílku probíhá v elektrostatických nebo mechanických odlučovačích z plynů topenišť jako zrnitý prášek cca 0,9mm. Jedná se o sklovité částice kulovitěho tvaru, které obsahují SiO_2 a Al_2O_3 . Tyto oxidy pak zajišťují pucolánovou aktivitu (latentní hydraulicitu) podobnou cementu. [16]

Při vlastním spalování jsou všechny mineralogické složky vystaveny vysokým teplotám, které prochází oxidačním nebo redukčním prostředím. Z toho vyplývá, že mineralogické vlastnosti popílků nezávisí jen na složení původního tuhého paliva, ale také se liší dle podmínek procesu, ve kterém byla paliva zpracována. Popílků obsahují mimo nerostných zbytků také podíl původního nespalitelného paliva ve formě nespalitelných anorganických příměsí. Popílků tedy vykazují různé chemické, mineralogické, fyzikální i granulometrické složení podle druhu spalovaného uhlí. Kvůli proměnlivému chemickému složení je při jejich dalším použití nutnost ověřovat kvalitu a složení popílků [13, 20].

Dle chemického složení rozlišujeme dva základní druhy popílků. Fluidní popílek (popílků typu C) vznikající spalováním při teplotě 850 °C. Popílek C obsahuje vyšší obsah CaO (do 20 %) a 50-70 % oxidů SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Klasický popílek (popílek typu F) obsahuje více než 70 % SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 a obsah CaO do 3%. Spalování probíhá při teplotě 1400-1600 °C. Popílků jsou tvořeny skelnou fází. Latentní hydraulická popílků typu F je dána skelnou fází. Popílek typu C má alkalický charakter a je reaktivní již po smíchání s vodou, kdy hydratuje podobně jako portlandský cement. [19, 18]

V České republice se každoročně vyprodukuje více než 10 mil. tun popílku ze spalování uhlí ve spalínách. Pro využití latentní hydraulicity se používají popílků zejména ze spalování černého a hnědého uhlí. Složení popílků je závislé na druhu spalování a na přídavných činidlech. Přídavná činidla se aplikují za účelem úpravy složení spalin. [12]

Využití popílků je v dnešní době velmi aktuální vzhledem k produkovanému množství. Výzkumem aktivace létavého popílku se zabývá od roku 2003 Ústav skla a keramiky VŠCHT Praha ve spolupráci s Katedrou technologie staveb ČVUT FS v Praze. Na základě alkalické aktivace létavého popílku byl vytvořen POPbeton[®], bezcementový beton. Vývoj pevností tohoto materiálu probíhá až do stého dne stáří. Pevnosti v tlaku po 28 dnech se pohybují v rozmezí od 40 - 60 MPa. Pevnosti v tlaku 100 MPa lze docílit přidáním jemně

mleté granulované vysokopecní strusky. Alkalická aktivace se provádí sodnými a draselnými hydroxidy společně s vodním sklem. [1, 18]

4.2 Metakaolin

Metakaolin je materiál tvořený přírodní surovinou kaolinitem, jehož výroba spočívá v pálení jílu, které obsahují kaolinit. Kalcinací kaolinitu vzniká při teplotě 560-580 °C metakaolinit (1). Kalcinace kaolinitu se provádí v rotačních pecích nebo na fluidním loži [19].



Kaolin v důsledku výpalu ztrácí vodu a dochází k rozpadu krystalické mřížky za vzniku metastabilních amorfních fází. Metakaolin se vyznačuje krystalickou strukturou a amorfním charakterem. Optimální teplota kalcinace byla v rámci výzkumu stanovena v rozmezí 700-750 °C. Pokud teplota výpalu překročí 900 °C, jsou amorfní fáze přeměněny na nové stabilní krystalické sloučeniny – mullit, tridymit, které nereagují s hydroxidem vápenatým a ztrácí tak pucolánovou aktivitu. [1, 11]

Teplota výpalu nesmí překročit teplotu mullitizace, která odpovídá 1100 °C v případě čistého kaolinu. Obsah nečistot v kaolinu tyto teploty snižuje. Musí se při výrobě dbát na to, aby se nevytvořila stabilní sloučenina mullit, kterou by nebylo možné alkalicky aktivovat [19].

Kaolin je plastická nezpevněná hornina, která se vyskytuje ve všech geologických prostředích. Zastoupení jílovité složky je větší než 80 %. Tato hornina vzniká zvětráním či hydrotermální přeměnou draselných živců a slíd za nízkých teplot a tlaků v kyselém prostředí. Tvoří samostatná ložiska, která se nachází na Karlovarsku, Plzeňsku atd. Hlavní složkou kaolinu je kaolinit. [21]

Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) je minerál, který patří do skupiny fylosilikátů. Skupina fylosilikátů představuje důležité produkty zvětralých horninotvorných minerálů, které mají významné technické použití. Jedná se zejména o jílové minerály. Jíl je přírodní směsný materiál zrnitého typu, který je plastický a po přidání přiměřeného obsahu vody tvrdne při

výpalu či vysušení. Kaolinit se vyznačuje bílou, nažloutlou či narůžovělou barvou. Tvrdost kaolinitu je v rozmezí od 2 - 2,5 na Mohsově stupnici a objemová hmotnost $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$. Kaolinit nejčastěji vystupuje ve formě šupinatých agregátů. Tyto šupinky jsou velikosti v řádech tisíců milimetrů. Lesk šupinek je matný. Mezivrstevní prostor je prázdný, nenachází se zde ani molekulová voda. Kaolinit rychle pohlcuje vodu a vytváří tak plastickou hmotu. [15]

Metakaolin je tedy pucolán vyrobený výpalem kaolinitických jílu, s velikostí zrn od $0,5 - 20 \text{ }\mu\text{m}$, vysoce reaktivními pucolánovými vlastnostmi a vysokým měrným povrchem. Využívání metakaolinu začalo v roce 1962. Metakaolin v té době sloužil jako plnivo do betonu. V rámci výzkumných činností bylo dokázáno, že lze metakaolin použít jako náhradu za cement (do cca 10 hm. %). V dnešní době se ve velké míře metakaolin používá společně s cementem do betonu, který odolává chemickému rozmrazování a zvyšuje odolnost povrchu betonu. [19, 22]

Současné použití metakaolinu je různorodé, závisí na charakteru úpravy fyzikálních vlastností. Metakaolin našel své uplatnění v keramickém průmyslu. Zde se využívá pro výrobu porcelánu a keramiky. Dále je používán v papírenském průmyslu, při výrobě žáruvzdorného zboží v hutnickém průmyslu, v chemickém průmyslu jako ředidlo účinných látek. Ve stavebnictví našel své uplatnění při výrobě obkladaček, šamotových cihel, izolačních hmot, střešních krytin, k přípravám omítkových barev nebo jako součást betonových či maltových směsí. [15]

Při výrobě alkalicky aktivovaných systémů se alkalická aktivace metakaolinu provádí hydroxidy sodnými nebo draselnými s vodním sklem. Alkalicky aktivované materiály dosahují pevností v tlaku v rozmezí 10-80 MPa a mají dobré trvanlivostní vlastnosti. [1]

4.3 Strusky

Jedná se o technogenní materiály s amorfni strukturou vznikající při výrobě surového železa ve vysokých pecích [1].

Struska je odpadní materiál hutnického průmyslu. Vykazuje latentní hydraulicitu a po alkalické aktivaci plní funkci pojiva ve směsi [14]. Struska je tvořena struskotvornými přísadami, popelem koksu, korodovanou vyzdívkou a dalšími nečistotami z výroby železa a oceli. [19].

Strusky se uplatňují ve stavebnictví při přípravě alkalicky aktivovaných materiálů, jsou přidávány k cementu pro zlepšení konečných vlastností betonu, struskové kamenivo je používáno u cestních staveb, jako plnivo do betonu, používá se při výrobě lehčených stavebních dílů. [19]

4.3.1 Vysokopecní granulovaná struska (VGS)

Vzniká při výrobě surového železa. Nejběžnější způsob výroby surového železa probíhá ve vysokých pecích kuželovitého tvaru. Vstupní suroviny (vsázka) pro výrobu železa jsou: [9]

a) Rudy - nejpoužívanější rudy pro výrobu železa jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Rudy pro výrobu železa [9]

Minerál	Krystalochemický vzorec	Skupina	Obsah Fe [%]
Magnetit	Fe_3O_4	Oxidy	72
Hematit	Fe_2O_3	Oxidy	70
Limonit	$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n \text{H}_2\text{O}$	Oxidy	50-69
Siderit	FeCO_3	Uhličitany	48
Chamosit	$(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Al}[(\text{OH})_8 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	Křemičitany	<38

b) Hutnický koks - slouží k redukci oxidů železa, je to téměř čistý uhlík.

c) Struskotvorné přísady

- vápenec (CaCO_3)
- dolomitický vápenec – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Při výrobě surového železa se kontinuálně naváží vsázka do vysoké pece. Koks se spaluje proudem přehřátého vzduchu. Toto spalování má za následek vysokou teplotu, vznikají oxidy uhelnatý a uhličitý. Vsázka ve vysoké peci postupně klesá do spodní části pece, kde se dostává do stále vyšších teplot. Poté probíhá redukce železných rud na surové železo. Surové železo díky své vysoké hustotě klesá do spodní části pece (nístěji) a zde se hromadí. Vápenec obsažený ve vsázce je reaktivní látkou, které na sebe váže křemík. Křemík je nežádoucí příměsí, je součástí strusky, která vytváří ochranný povlak nad surovým železem. Struska při výrobě železa zaujímá ochrannou funkci a zároveň na sebe váže nečistoty, zejména síru. Struska i surové železo vznikají neustále a je třeba je z pece vypouštět. V této části se provede odpich. Ten se provádí po cca po dvou hodinách. Vypouští se struska a surové železo. Struska vzniká v množství 400-600 kg na 1 t surového železa. [19, 9]

Teplota vysokopecní strusky dosahuje hodnot 1450-1550 °C. Rychlé chlazení pro zachování skelné struktury je zabezpečováno proudem vody, do níž je obsah kolib vyléván. Skelná struktura strusky způsobuje její latentně hydraulické vlastnosti. V případě pomalu chladnoucí strusky se skelné fáze tvoří omezeně a převládají fáze krystalické. Dochází ke krystalizaci a strusky jsou hydraulicky neaktivní. Struska je ke granulaci dovážena v struskových pánvích – kolibách a nemá rovnoměrnou teplotu v celém svém objemu, při poklesu teploty pod hodnotu 1350 °C, která je považována za kritickou, začne struska krystalizovat. [19]

Vysokopecní granulovaná struska je tvořena oxidy (CaO 35-38 %, SiO₂ 34-38 %, Al₂O₃ 6-9%, MgO 10-14%, MnO 0,5-2%, FeO + Fe₂O₃ 0,5-1 %, BaO, TiO₂), dále nežádoucími sulfidy (CaS, MgS, BaS, MnS, Na₂S, K₂S) a také nitridy a karbonitridy. Přesné složení závisí na vsázce, tedy vstupních surovinách. [19]

Strusky našly své uplatnění díky své latentní hydraulicitě při výrobě anorganických hydraulických pojiv. Alkalická aktivace se provádí roztokem sloučenin alkalického kovu nejčastěji hydroxidu a uhličitanu nebo křemičitanu. Výhodný je také roztok sodného vodního skla. [1]

Pevnosti v tlaku často dosahují hodnot nad 100 MPa a při proteplování až 180 MPa. Tyto materiály vykazují vysokou odolnost proti působení agresivních látek. Mohou se využívat jako fixace radioaktivních látek. [1]

4.3.2 Ocelářská struska

Ocelářská struska se produkuje v ocelářských a pánvových pecích při výrobě oceli, v Siemens – Martinských pecích převážně v České republice. V dnešní době je ocel vyráběna v kyslíkových konvertorech a v elektrických obloukových pecích. Složení ocelářských strusek je proměnlivé z důvodu výroby oceli na různých druzích zařízení. [13]

Ocelářské strusky obsahují minerály olivín, mervinit, C_3S , C_2S , C_2F , gehlenit, C_4AF , cristobalit, CaO , MgO a další. Obsah oxidů je stejný jako u VGS, jen se liší v procentuálním zastoupení. [19] Z ocelářských strusek se vyrábí kamenivo sloužící jako podklad pro silniční konstrukce a součást asfaltových silničních povrchů. Tyto strusky jsou charakteristické objemovou nestálostí, rozpadavostí, obsahem volného vápna CaO a MgO . [19]

Ocelářské strusky dosud hledají uplatnění pro využití své latentní hydraulicity. [19]

4.4 Aktivátory

Jedná se o alkalický roztok způsobující rozpuštění skelné fáze. Následují hydratační procesy, kdy dochází k tuhnutí a tvrdnutí alkalicky aktivovaných materiálů. Nejběžnější aktivátor latentní hydraulicity ve stavebnictví je $Ca(OH)_2$. Pokud je hydroxid vápenatý schopen určité látky aktivovat, jsou pak tyto látky považovány za pucolány. V některých případech je hydroxid vápenatý neúčinný a to u látek s obsahem SiO_2 a Al_2O_3 ve stabilních formách. Aktivátory schopné vzbuzení těchto látek se řadí do rozpustných sloučenin alkalických kovů – uhličitánů, hlinitanů, hydroxidů a křemičitanů. [1, 19]

Sodné sloučeniny pro latentní hydraulicitu našly své uplatnění a jsou nejrozšířenější formou aktivátorů. Aktivátory jsou převážně používány v kapalném stavu, avšak vyskytují se i v pevném skupenství. U roztoků je výhodou snadné promísení s ostatními složkami a rychlý narůst hydratačních procesů. Aplikace pevného aktivátoru s sebou přináší riziko zvýšeného vývinu tepla, proto je nutné zabránit případnému nadměrnému přehřátí směsi. [19]

Aktivátory pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů jsou z ekonomického hlediska nejdražší surovinou pro přípravu kompozitů. Zejména v tekutém stavu přináší bezpečností a zdravotní rizika, jelikož se jedná o silné žíraviny. Pevné aktivátory jsou v tomto ohledu bezpečnější, ale také cenově náročnější. [1]

V následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány nejčastěji používané typy aktivátorů, konkrétně vodní skla a hydroxidy.

4.4.1 Vodní sklo:

Vodní sklo je nejčastěji používaný alkalický aktivátor, který je ve formě koloidního roztoku alkalických křemičitanů nebo pevného hydratovaného či nehydratovaného alkalického křemičitanu. Složení vodního skla se vyjadřuje silikátovým modulem M_s (2). [19]

$$M_s = \frac{SiO_2}{Na_2O} \quad (2)$$

Průmyslově vyráběný koloidní roztok dosahuje silikátového modulu okolo 2,0-3,7. Při aplikaci tohoto aktivátoru se silikátový modul reguluje přidavkem roztoku NaOH. Aktivní složkou je Na_2O . Vyšší obsah Na_2O zvyšuje pevnosti hydratovaných směsí a urychluje proces hydratace, nadměrné množství však způsobuje zvýšenou tvorbu výkvětů u konečných produktů. [19]

Výroba se provádí tavením křemičitanu sodného, který se vyrábí ze sklářského písku a sody, ve vanových pecích za teplot 1400-1600 °C. Takto roztavená směs se prudce chladí. Chlazení má za účel rozpraskání na co nejmenší části, a tím jednodušší rozpouštění. Dále se pomocí hydroxidu sodného, vody, zvýšené teploty a tlaku rozpouští v autoklávu na tekuté vodní sklo. [18]

Pevné vodní sklo vzniká sušením, zahušťováním s přidavkem NaOH v podtlakových podmínkách koloidního vodního skla. Vyrábí se nehydratované a hydratované vodní sklo. Pevné vodní sklo obsahuje do 30 hm. % vody. Je dobře rozpustné ve vodě. [19]

4.4.2 Hydroxidy

Jedná se o silně zásadité anorganické látky. Hydroxidy jsou hygroskopické látky, které dobře pohlcují vodu. Při rozpouštění ve vodě hydroxidy vyvíjejí značnou část tepla. [1]

Hydroxidy se vyrábějí elektrolytickým rozkladem chloridu sodného či draselného. Hydroxid sodný či draselný se dříve vyráběl kaustifikačním procesem z vodného roztoku uhličitanu sodného či draselného za působení nadbytku hydroxidu vápenatého ve formě hašeného vápna. Tímto způsobem vznikal hydroxid vápenatý. Hydroxid vápenatý se oddělil sedimentací. V další části bylo nutné odpaření vody z roztoku, kdy se získal surový hydroxid sodný. [18]

5. Praktická část

Praktická část byla zaměřena na ověření základních fyzikálně-mechanických parametrů. Byly stanoveny a popsány vlastnosti vstupních surovin, metodika zkoušení, zkušební postupy, způsob uložení směsí.

5.1 Cíl práce

Hlavním cílem experimentu bylo posouzení základních fyzikálně-mechanických vlastností alkalicky aktivovaných materiálů v závislosti na zvoleném typu pojiva. Cílem také bylo zhodnotit, který ze silikátových modulů (1 nebo 2) je vhodnější pro konkrétní typ pojiva a jaký vliv na vývoj pevností má proteplování připravených těles. U navržených receptur byla sjednocujícím parametrem konzistence čerstvé směsi. U připravených vzorků pak byly stanoveny počátky a konce dob tuhnutí, pevnosti v tahu a v tlaku na proteplovaných a neproteplovaných vzorcích vždy po 1, 7 a 28 dnech zrání a také byla provedena zkouška mrazuvzdornosti pro konečné porovnání vlastností jednotlivých kompozitů.

5.2 Specifikace vstupních surovin

Jako vstupní suroviny pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů v této práci byly použity metakaoliny I-META 4 a N-META 4, popílek z elektrárny Dětmárovice a velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska z Kotouče Štramberk. Tyto vstupní suroviny byly v práci použity jako pojiva do alkalicky aktivovaných materiálů. Normový písek, hydroxid sodný a vodní sklo patřily k dalším surovinám použitým k výrobě.

5.2.1 Popílek

Při práci byl použit fluidní popílek s množstvím CaO v procentuálním zastoupení 4 % z elektrárny Dětmárovice. Zastoupení jednotlivých oxidů je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2. Procentuální zastoupení jednotlivých oxidů v popílku Dětmárovice [1]

Oxid	Procentuální zastoupení [%]
Si ₂ O	52,4
Al ₂ O ₃	24,2
Fe ₂ O ₃	6,4
CaO	4
K ₂ O	2,8
MgO	2,8
TiO ₂	1
SO ₃	0,8
Na ₂ O	0,3

5.2.2 Metakaoliny

V práci byly použity dva druhy metakaolinů. Jednalo se o produkty společnosti Sedlecký kaolin, a.s., a to metakaoliny I–META 4 a N–META 4. Metakaolin s jasně bílou barvou odpovídá typu N–META 4. Používá se při výrobě keramiky a v papírenském průmyslu. Metakaolin I–META se vyznačuje oranžovo-červenou barvou. Používá se jako příměs do betonu, malt a nátěrových hmot. [1] Procentuální zastoupení oxidů je uvedeno v Tab. 3. Základní parametry metakaolinů jsou popsány v Tab. 4 a v Přílohách 1 a 2.

Tab. 3. Procentuální zastoupení oxidů v jednotlivých metakaolinech

Oxid	Procentuální zastoupení [%]	
	N - META 4	I - META 4
SiO ₂	54	52
Al ₂ O ₃	43	41
Fe ₂ O ₃	0,9	1,9
CaO	0,3	0,3
K ₂ O	0,5	1,6
MgO	0,3	0,3
TiO ₂	0,6	0,3
Na ₂ O	0,01	0,01

Tab. 4. Základní parametry metakaolinů

Pojiva	Parametry			
	Olejové číslo [g/100g]	Sypná váha [kg/m ³]	Ztráta žíháním [%]	Vlhkost [%]
N - META 4	63	380	0,5	0,5
I - META 4	67	380	1,8	0,5

5.2.3 Vysokopecní granulovaná struska

V práci byla použita velmi jemně mletá vysokopecní granulovaná struska SMŠ 400 od firmy Kotouč Štramberk, spol. s.r.o. Vysokopecní granulovaná struska je práškové latentně hydraulické pojivo bílé barvy. Používá se v silniční výstavbě, do maltových směsí, přidává se do cementu. Cementy s vysokým procentem vysokopecní strusky se nazývají vysokopecní cementy. Aktivaci vysokopecní granulované strusky je možno provést cementy, vápnem, sádkou a alkalickými sloučeninami. Procentuální zastoupení oxidů ve vysokopecní strusce je uvedeno v Tab. 5 a v Příloze 3.

Tab. 5: Procentuální zastoupení oxidů ve vysokopecní granulované strusce

Struska mletá	Procentuální zastoupení [%]
CaO	40
MgO	8,9
SiO ₂	39,9
Al ₂ O ₃	6,9
Fe ₂ O ₃	0,4
SO ₃	0,6
(CaO + MgO)/ SiO ₂	1,2

5.2.4 Normový písek

Všechny zkoušky byly provedeny s přidavkem normalizovaného písku sloužícího jako plnivo jednotlivých směsí. Frakce normového písku je 0/2 mm dle ČSN EN 196 – 1 od společnosti Provodínské písky, a.s. Písek dle ČSN byl jemný, střední a hrubý. [1]

5.2.5 Aktivátor

Aktivace směsí byla prováděna vodním sklem firmy Kittfort, které bylo upraveno pomocí 33 % roztoku hydroxidu sodného. Silikátový modul Ms byl snížen z hodnoty 3,68 přidáním 33 % roztoku hydroxidu sodného. Konečný silikátový modul jednotlivých aktivátorů se blížil hodnotám 1,5 (dále v práci uváděn jako silikátový modul 1, Ms = 1) a 2,6 (dále v práci pro zjednodušení uváděn pouze jako silikátový modul 2, Ms =2). Vlastnosti použitého vodního skla a hydroxidu sodného jsou uvedeny v Přílohách 4 a 5.

5.3 Metodika zkoušení

Metodika zkoušení alkalicky aktivovaných materiálů není nijak definována. Pro alkalicky aktivované materiály neexistuje žádná norma pro zkoušení. Jednotlivé zkoušení se provádí podle technických norem pro betony a malty, které jsou v rámci této práce různě upravované.

5.4 Příprava receptur

V této podkapitole jsou uvedeny postupy přípravy a způsob uložení těles.

5.4.1 Míchání směsí

Postup míchání byl v souladu s požadavky normy ČSN EN 196 – 1 a ČSN 196 - 3. Míchání směsí bylo provedeno ve dvou fázích. První fáze míchání, byla provedena pouze s pojivem a vodou. Složka pojiva s vodou se vnesla do nádoby tak, aby nedošlo ke ztrátám. Po styku pojiva s vodou se spustilo laboratorní zařízení (viz. Obr. 1). Laboratorní zařízení bylo spuštěno nízkou rychlostí na dobu 90 sekund. Poté následovala 15 sekundová prodleva pro potřebné setření směsi ulpívající na stěnách nádoby a tato směs byla umístěna do středu nádoby. Po uplynutí pauzy následovalo další míchání po dobu 90 sekund. [5, 6]

Druhá fáze míchání spočívala v dávkování normového písku. Po 30 sekundách stálého míchání nízkou rychlostí se v následujících 30 sekundách plynule přidával normový písek z dávkovače. Poté pokračovalo míchání po dobu 30 sekund vysokou rychlostí. Po ukončení cyklu následuje zastavení laboratorní míchačky na dobu 90 sekund. Tato doba sloužila k otření směsi ulpívající na stěnách nádoby a k umístění směsi do středu nádoby. Po dokončení se pokračovalo v míchání vysokou rychlostí po dobu 60 sekund. [5]



Obr. 1: Laboratorní míchačka Beton Systém MI - CMA

5.4.2 Zhotovení těles pro zkoušení

Ihned po namíchání směsi do předem připravené ocelové formy rozměrů 40 x 40 x 160 mm, které slouží ke zhotovení tří zkušebních těles, byla dávkována namíchaná směs. Forma se umístila na magnetický vibrační stolek. Vibrační stolek se spustil na dobu 120 s, kdy byla forma naplněna do jedné poloviny pomocí zednické lžice. Doplnění formy následovalo v průběhu dalších 120 s, kdy se směs lehce přeplnila. Vycházelo ze z normy ČSN EN 196-1, kdy byla upravená doba plnění a samotné plnění formy. [5]

5.4.3 Uložení zkušebních těles

Forma s namíchanou směsí byla uložena do vlhkostní skříně s relativní vlhkostí nejméně 90 % a trvalou teplotou 20 ± 1 °C. Vrchní část formy byla opatřena skleněnou deskou nebo smršťovací folií. Každá forma se umístila ve vodorovné poloze do prostoru skříně. Po 20 – 24 hodinách, proběhlo odformování zkušebních těles pomocí ocelového kladívka. Tělesa se poté uložila zpátky do vlhkostní skříně na skleněnou desku nebo proběhlo uložení těles do vody. Tělesa uložená ve vodě byla uložena tak, aby voda měla přístup ke všem jejich stranám. Teplota vody byla 20 ± 1 °C. [5]

Namíchané směsi porovnávaných protetpovaných vzorků byly uloženy do klimatické komory, zde setrvaly po dobu 24 hodin při teplotě 80 °C a 90 % vlhkosti.

5.5 Zkoušení

V této podkapitole jsou popsány zkušební postupy pro ověření vlastností jednotlivých směsí.

5.5.1 Zkouška konzistence

Podobná konzistence všech směsí byla sjednocujícím kritériem pro možnost vyhodnocení vlastností jednotlivých systémů připravených z rozdílných pojiv. Konzistence čerstvé směsi byla určena pomocí střešacího stolku dle normy ČSN EN 1015 – 3. [3]

Zkouška konzistence spočívá ve stanovení hodnoty průměru rozlitého zkušebního vzorku čerstvé směsi. Čerstvá směs je umístěna na předepsané desce střešacího stolku pomocí kovového kužele. Deska střešacího stolku volně padá z předepsané výšky s předepsaným počtem svislých pádů. [3]

Povrch desky včetně kovového kužele byl před každou zkouškou očištěn pomocí vlhké tkaniny a otřen do sucha. Poté se její povrch natřel tenkou vrstvou minerálního oleje s nízkou viskozitou. Zkoušení spočívalo v umístění kovového kužele na desku střešacího stolu. Kovový kužel byl naplněn ve dvou vrstvách a přitlačován rukou k desce střešacího stolu. Každá vrstva byla rozprostřena 10 údery dřevěného dusadla, tak aby kovový kužel byl rovnoměrně naplněn. Přebytečná směs byla pomocí zednické lžice setřena a volná plocha desky pečlivě otřena. Po 15 s se kovový kužel zvedl kolmo vzhůru a směs umístěná na desce se pomocí střešacího stolu rozlila 15 nárazy s konstantní frekvencí 1 zdvihu za sekundu. Průměr rozlitého koláče směsi se změřil ve dvou na sebe kolmých směrech pomocí měřítka. Výsledky měření byly zaznamenány v mm s přesností na 1 mm a zprůměrovány. [3]

5.5.2 Stanovení dob tuhnutí

Stanovení dob tuhnutí bylo prováděno dle normy ČSN EN 196-3 na Vicatově přístroji. [6] Oproti normovému postupu byly tyto hodnoty v experimentu stanovovány na recepturách včetně plniva, jelikož nebylo možno připravit kaši bez plniva s dávkou záměsové vody, adekvátně snížené o množství vody potřebné pro smáčení kameniva. Tato voda je totiž součástí aktivátoru a v rámci experimentu nebylo možno provádět její redukci v roztoku. Toto stanovení tedy sloužilo spíše jen pro orientační zhodnocení rozdílného chování u jednotlivých receptur. [6]

Za dobu tuhnutí je považován časový úsek, kdy jehla vnikne do stanovené hloubky namíchané směsi. [6]

Počátek doby tuhnutí se stanovuje na Vicatově přístroji opatřeném jehlou. Vicatův přístroj se nastaví do nulové polohy. Docílení nulové polohy bylo provedeno postavením jehly na skleněnou destičku a nastavením nulové polohy rysky stupnice. Poté se jehla zdvihne do horní výchozí polohy. Vicatův prstenec se naplní směsí alkalicky aktivovaného materiálu a urovná se povrch. Naplněný prstenec se umístí na skleněnou destičku pod jehlu Vicatova přístroje, která se opatrně ustaví tak, aby se dotýkala směsi. V této poloze zůstává po dobu 1 – 2 sekund, aby se zabránilo nadměrnému zrychlení. Poté se pohyblivá část přístroje uvolní

a jehla proniká svisle do namíchané směsi. V poslední části se odečte hloubka vniknutí nejpozději však do 30 sekund. [6]

Stanovení počátku doby bylo provedeno ve vhodně zvolených intervalech po 5 minutách a na vhodně zvolených místech, vzdálených 10 mm od okraje prstence a 10 mm od posledního vpichu. Po každém vpichu byla jehla ihned očištěna. Počátkem doby tuhnutí je rozuměna doba od vsypání pojiva do míchačky (nulový čas) do okamžiku, kdy se jehla zastaví nad skleněnou destičkou ve vzdálenosti 6 ± 3 mm. Výsledky měření byly zaznamenány s přesností na 5 min. [6]

Konec doby tuhnutí byl stanoven na Vicatově přístroji. Vicatův prstenec se obrátil, aby mohly být provedeny zkoušky na původně přilehlé straně ke skleněné destičce. Jehla určená ke stanovení konce doby tuhnutí obsahovala na konci jehly kruhový nástavec. Koncem doby tuhnutí je rozuměna doba od vsypání pojiva do míchačky (nulový čas) do okamžiku, kdy jehla pronikla do směsi jen 0,5 mm. Koncem doby tuhnutí se rozumí doba, kdy kruhový nástavec nezanechává žádný otisk na povrchu zkoušené směsi. [6]

5.5.3 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno pomocí normy ČSN – EN 12390 – 7 na proteplováných a neproteplováných vzorcích. Zkušební těleso bylo vyjmuto z místa uložení a poté povrchově osušeno suchou tkaninou. Tělesa byla změřena pomocí posuvného měřítka, kde byly zaznamenány tři hodnoty rozměru výšky a šířky. Tyto hodnoty byly dále zprůměrovány. V poslední části se provedlo změření hmotnosti pomocí laboratorní váhy. [4]

Objemová hmotnost (3) byla vypočtena z hodnot objemu tělesa a jeho hmotnosti dle následujícího vztahu:

$$D = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3)$$

kde	D	je objemová hmotnost v kg/m^3
	m	je hmotnost zkušební tělesa v kg
	V	je objem tělesa v m^3

Výsledek zkoušky se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 . [4]

5.5.4 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla provedena na vytvořených zkušebních tělesech jednotlivých směsí v souladu s normou ČSN EN 196 – 1.

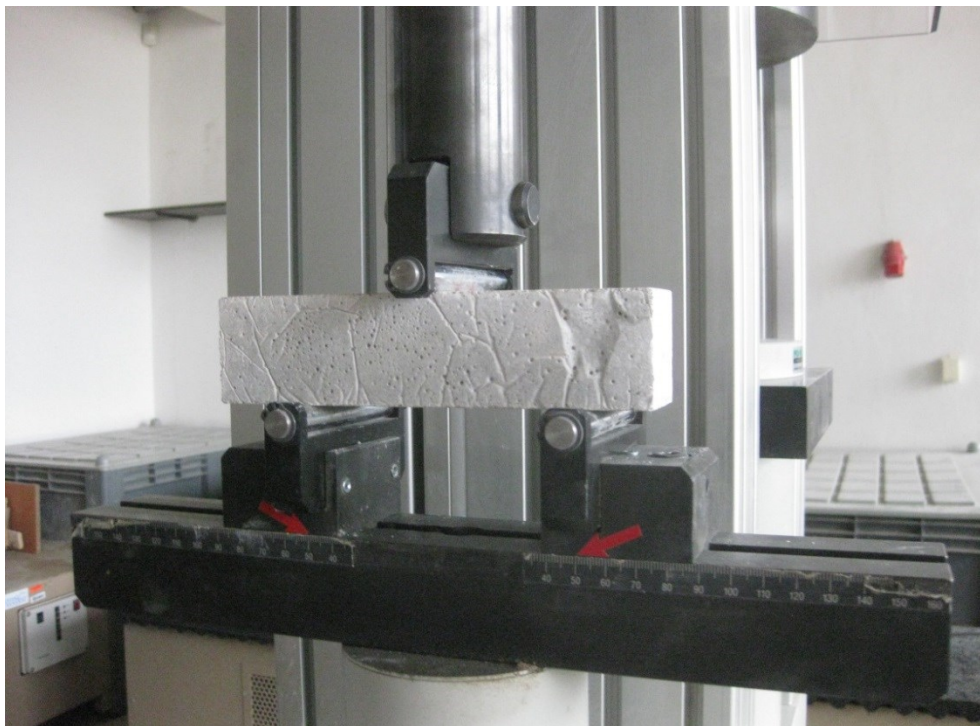
Zkoušený trámeček byl uložen do zkušebního zařízení (viz. Obr. 2) tak, aby jeho podélná osa byla kolmá k válcovým podporám. Zatížení bylo vynakládáno přes jeden zatěžovací válec. Směr zatěžování byl kolmý na směr plnění směsí do formy při zhotovování zkušebních těles. Zatížení vynaložené na zlomení trámečků se zvyšovalo rovnoměrnou rychlostí $50 \pm 10 \text{ N/s}$. Zkoušení bylo provedeno vždy na třech tělesech. Poloviny trámečků vzniklých při zkoušce se uchovaly pro zkoušku pevnosti v tlaku. [5]

Pevnost v tlaku se vyjádřila pomocí vzorce (4):

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b_1 * b_2^2} [\text{N/mm}^2] \quad (4)$$

kde	R_f	je pevnost v tahu za ohybu vyjádřená v N/mm^2
	F_f	je zatížení vynaložené na střed trámečku pro dosažení jeho zlomení v Newtonech
	l	je vzdálenost mezi podporami v mm
	b_1	je šířka zkoušeného trámečku
	b_2	je výška zkoušeného trámečku

Vyjádření výsledků proběhlo na třech vzorcích jednotlivých záměsí. Výsledek je hodnotou zprůměrování třech vzorků a vyjádřen s přesností na 0,1 N/mm². [5]



Obr. 2: Zkušební zařízení pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu

5.5.5 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku se provedla na trámečcích, které byly předchozí zkouškou rozlomeny na dvě části. Zkouška se provedla na zkušebním lisu (viz. Obr. 3) v souladu s normou ČSN EN 196 – 1. Poloviny trámečků byly položeny na destičky zkušebního stroje tak, aby koncové strany přesahovaly asi o 10mm destičky. Boční strany se vystředí na destičkách v rozmezí $\pm 0,5$ mm. Zatížení zkušebního stroje se zvyšuje plynule rychlostí 2400 ± 200 N/s až do jeho porušení. [5]

Pevnost v tlaku je vyjádřena vzorcem (5):

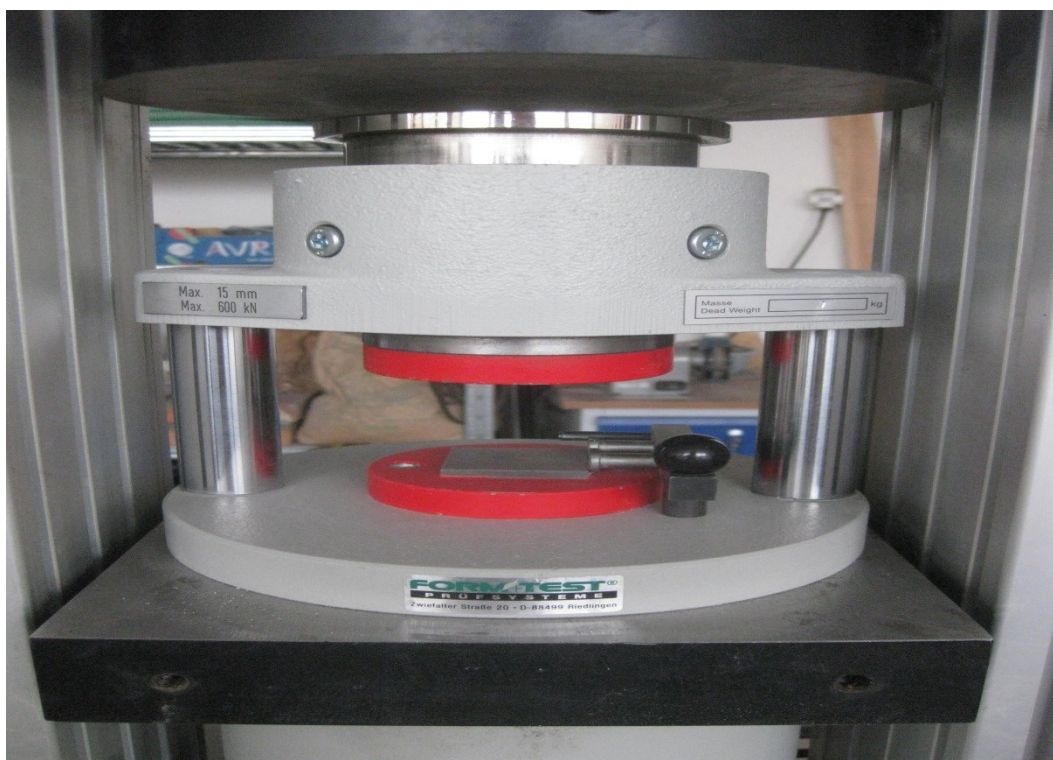
$$R_c = \frac{F_c}{1600} [\text{N/mm}^2] \quad (5)$$

kde R_c je pevnost v tlaku v N/mm^2

F_c je zatížení vynaložené na porušení zkušební vzorku vyjádřené v Newtonech

1600 je to plocha destiček zkušebního zařízení (40 x 40) vyjádřená v mm^2

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno na šesti vzorcích. Naměřené výsledky se poté zprůměrovaly a vyjádřily s přesností na $0,1 \text{ N/mm}^2$. [5]



Obr. 3: Zkušební zařízení pro zkoušku pevnosti v tlaku

5.5.6 Zkouška mrazuvzdornosti

Zkouška mrazuvzdornosti spočívá ve střídavém rozmrazování a zmrazování těles nasycených vodou, požadovaným počtem zmrazovacích cyklů, přičemž se sleduje míra porušení a stanovuje se stupeň mrazuvzdornosti. Zkouška mrazuvzdornosti probíhala dle normy ČSN 72 2452. [2]

Mrazuvzdornost byla zkoušena na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm z alkalicky aktivovaných materiálů. Hodnoty rozměrů, hmotností, objemových hmotností byly zaznamenány před zahájením zkoušky. Zkouška proběhla po 28 dnech zrání zkušebních trámečků. Ke zkoušce byla zhotovena z každé směsi jedna sada, která obsahovala tři trámečky a jedna sada připravovaných směsí k porovnání. [2]

Tělesa byla uložena minimálně 30 mm od okraje mrazícího prostoru. Mezi jednotlivými tělesy byla mezera na proudění vody minimálně 10 mm. Teplotní čidla v mrazícím prostoru se nedotýkala zkušebních těles a byla volně uložena v prostoru. [2]

Před zkouškou se tělesa nasýtila vodou po dobu 24 hodin ve vodní lázni s teplotou $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ tak, aby byla ponořena 30 mm pod vodní hladinou. Zkušební tělesa byla ihned po nasycení vodou zmrazena. [2]

Jeden zkušební zmrazovací cyklus trvá čtyři hodiny a nejméně ze dvou hodin sestává rozmrazovací cyklus. Při zmrazování jsou zkušební tělesa v prostředí o teplotě -18 až -23°C . Při rozmrazování byla tělesa ponořena do 20°C teplé vody. [2]

Po ukončení zkoušky se jednotlivá tělesa změřila a zvážila. Poté se sada trámečků zkoušela destruktivně na tah za ohybu a v tlaku. Výsledkem jsou úbytky hmotnosti zkoušených trámečků v procentech, pevnosti trámečků v tahu za ohybu a stanovení pevnosti v tlaku na úlomcích trámů. Posledním výsledkem je stanovení součinitele mrazuvzdornosti. [2]

Součinitel mrazuvzdornosti je poměr aritmetického průměru pevnosti v tahu za ohybu zkušebních trámečků k aritmetickému průměru hodnot pevností v tahu za ohybu porovnávané druhé sady. Druhá sada porovnávaných vzorků byla sada těles zkoušená po 28 dnech zrání. [2]

Aby byl materiál označen jako mrazuvzdorný, nesmí pro daný počet zmrazovacích cyklů vykazovat úbytek pevnosti u zmrazovaných vzorků větší než 25 % oproti pevnostem porovnávacích vzorků. [2]

5.6 Vyhodnocení zkoušek vlastností alkalicky aktivovaných systémů

Cílem práce je vyhodnocení vlastností alkalicky aktivovaných materiálů v závislosti na určitém typu pojiva. V práci bylo použito osm receptur alkalicky aktivovaných materiálů se silikátovým modulem 1 a 2. Směsi se silikátovým modulem 1 tvořily čtyři receptury, stejně jako směsi se silikátovým modulem 2.

Práce probíhala ve třech etapách.

První část výzkumu se týkala stanovení optimálního složení receptur. Základní složení směsí je uvedeno v Tab. 6. U jednotlivých záměsí bylo zvoleno shodné množství plniva a pojiva, směsi se lišily v množství aktivátoru, jehož množství bylo stanoveno na základě předchozích experimentů na FAST VŠB-TUO a také v množství záměsové vody. Její množství bylo určeno u jednotlivých směsí tak, aby výsledná hodnota rozlití směsí činila 120 – 140 mm při stanovení konzistence pomocí střešacího stolku. V této etapě bylo provedeno rovněž stanovení počátků a konců dob tuhnutí.

Tab. 6: Základní složení směsí

Receptury - alkalicky aktivované systémů								
Pojivo	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
Silikátový modul [M_s]	1	2	1	2	1	2	1	2
Surovina	Množství							
Aktivátor [ml]	82	127	129	198	129	198	129	198
Normový písek [g]	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Pojivo [g]	350	350	350	350	350	350	350	350
Voda [ml]	množství vody v závislosti na rozlití (120 - 140 mm)							

Druhá etapa zkoušení proběhla na ztvrdlých protetovaných a neprotetovaných tělesech, kde se zjišťovala pevnost jednotlivých vzorků směsí. Stanovení pevnosti těles se provedlo po 1, 7 a 28 dnech. U těchto směsí se dále provedlo vyhodnocení objemové hmotnosti a mrazuvzdornosti.

Poslední etapou bylo vyhodnocení vlastností jednotlivých směsí a grafické vyhodnocení výsledků.

5.7 Hodnocení výsledků čerstvých alkalicky aktivovaných materiálů

Vzorky jednotlivých receptur byly připravované dle kapitoly 5.4.1. U směsí s různým typem pojiva byly stanoveny konzistence a po konečném stanovení jednotlivých receptur pro další práce byly určeny počátky a konce dob tuhnutí uvedených dále v kapitole.

5.7.1 Konzistence čerstvých směsí

Při práci byly receptury stanoveny na základě jednotného rozlití, které se pohybovalo v rozmezí od 120 mm do 140 mm. Postup zkoušení je uveden v kapitole 5.5.1. Požadovaného rozlití bylo docíleno přidáváním nebo ubíráním záměsové vody. Receptury po požadované úpravě na uvedené rozlití se dále používaly v práci. Stanovení množství vody v mililitrech viz Tab. 7.

Tab. 7: Množství záměsové vody jednotlivých směsí

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul [M_s]	1	2	1	2	1	2	1	2
Množství vody [ml]	110	75	60	10	130	70	200	150
Rozlití 1 [mm]	130	135	130	135	130	135	130	135
Rozlití 2 [mm]	133	135	125	135	130	130	135	135
Celkové rozlití [mm]	131,5	135	127,5	135	130	132,5	132,5	135

Uvedené výsledky sloužily pro další práci s alkalicky aktivovanými materiály. Výsledné složení připravovaných směsí je uvedeno v tabulce Tab. 8. V uvedené tabulce je zaznamenáno množství potřebné záměsové vody k jednotlivým směsím na požadované rozlití. Největší množství vody potřebné k požadovanému rozlití bylo u směsi metakaolinu N-META, kde potřebné množství bylo 200 ml, naopak nejmenší množství vody vykazovala směs popílku – Dětmárovice, kde bylo u míchané směsi požadováno pouze 10 ml vody.

Tab. 8: Výsledné složení připravovaných směsí

Receptury - alkalicky aktivované systémů								
Pojivo	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
Silikátový modul [M _s]	1	2	1	2	1	2	1	2
Surovina	Množství							
Aktivátor [ml]	82	127	129	198	129	198	129	198
Normový písek [g]	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Pojivo [g]	350	350	350	350	350	350	350	350
Voda [ml]	110	75	60	10	130	70	200	150

5.7.2 Stanovení dob tuhnutí

U jednotlivých receptur byly stanoveny počátky a konce doby tuhnutí. Stanovení dob tuhnutí se provedlo dle postupu uvedeného v kapitole 5.5.2 na výsledném složení směsí. Oproti normovému postupu byly tyto hodnoty v experimentu stanovovány na recepturách včetně plniva, jelikož nebylo možno připravit kaši bez plniva s dávkou záměsové vody, adekvátně snížené o množství vody potřebné pro smáčení kameniva. Tato voda je totiž součástí aktivátoru a v rámci experimentu nebylo možno provádět její redukci v roztoku. Toto stanovení tedy sloužilo spíše jen pro orientační zhodnocení rozdílného chování u jednotlivých receptur. Získané výsledky jsou uvedeny v Tab. 9.

Uvedená tabulka ukazuje, že směsi se silikátovým modulem $M_s = 1$ vykazovaly rychlejší počátky doby tuhnutí a také rychlejší dobu konce tuhnutí na rozdíl od směsí se silikátovým modulem $M_s = 2$. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že s rostoucím silikátovým modulem vzrůstá počáteční doba tuhnutí směsí. Toto může být zapříčiněno vložením většího množství alkálií v alkalicky aktivovaných materiálech.

Směsi se silikátovým modulem $M_s = 1$ s přidáním pojiva metakaolinu I-META měly nejrychlejší počáteční dobu tuhnutí, která činila 26 minut, naopak směs s pojivem popílku Dětmárovice vykazovala nejdelší dobu počátku tuhnutí, která byla stanovena na 45 minut. Nejrychlejší konec doby tuhnutí 40 minut vykazovala směs metakaolinu I-META a nejpomalejší dobu konce tuhnutí 75 minut metakaolin N-META.

Směsi se silikátovým modulem $M_s = 2$ ve všech případech vykazovaly při stanovení dob tuhnutí o 50 % delší časy oproti směsím se silikátovým modulem $M_s = 1$. Nejkratší dobu počátku tuhnutí vykazovaly směsi popílku Dětmárovice a vysokopecní granulované strusky, kde činila 100 minut. Nejrychlejší doba konce tuhnutí byla zaznamenána u vzorku vysokopecní granulované strusky a popílku Dětmárovice po 110 minutách.

Tab. 9: Počátky a konce dob tuhnutí směsí [min.]

Směs	Vysokopecní granulované strusky		Popílek Dětmárovice		Metakaolín I-META		Metakaolín N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul [M_s]								
Počátek doby tuhnutí [min.]	35	100	45	100	26	140	35	170
Konec doby tuhnutí [min.]	45	110	55	110	40	180	75	195

5.8 Hodnocení výsledků ztvrdlých alkalicky aktivovaných materiálů

Hodnocení výsledků proběhlo na směsích zrajících po dobu 1, 7 a 28 dní. Vzorky byly míchány a uloženy dle kapitoly 5.4. Dále byl na vzorcích zjišťován vliv protěplování.

5.8.1 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla stanovena dle postupu uvedeného v kapitole 5.5.3. Na neproteplováných (Tab. 10) a proteplováných (Tab. 11) alkalicky aktivovaných materiálech. Uvedené hodnoty objemových hmotností jednotlivých vzorků jsou stanovené jako průměrné hodnoty ze všech namíchaných směsí, které byly v této práci připraveny. Objemové hmotnosti se stanovovaly po 1, 7 a 28 dnech hydratace.

Tab. 10: Objemové hmotnosti neproteplováných směsí

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul [M_s]								
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2340	2330	1980	1970	2110	2100	2100	2090

Tab. 11: Objemové hmotnosti proteplováných směsí

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul [M_h]								
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2280	2280	2080	1960	2030	1950	2030	1990

Z uvedených tabulek vyplývá, že maximální objemová hmotnost vzorků se silikátovým modulem $M_s = 1$, byla změřena u vysokopecní granulované strusky, kde u neproteplováných směsí dosáhla hodnoty 2340 kg/m^3 a u proteplováných 2280 kg/m^3 . Naopak minimální objemové hmotnosti dosáhl vzorek popílku u neproteplováných směsí, hodnota odpovídá 1980 kg/m^3 , a u proteplováných směsí vzorek metakaolinu I-META a N-META s objemovou hmotností 2030 kg/m^3 . Vzorky aktivované vyšším silikátovým modulem $M_s = 2$ dosáhly maximální objemové hmotnosti u vysokopecní granulované

strusky, kde u neprotepovaných směsí atakovaly hodnoty 2330 kg/m^3 a u protepovaných směsí hodnoty 2280 kg/m^3 . Minimální objemové hmotnosti u neprotepovaných vzorků byly stanoveny u popílku, kde byla zjištěna hodnota 1970 kg/m^3 , a u protepovaných to byl vzorek alkalicky aktivovaného metakaolinu N-META, kde hodnoty objemové hmotnosti dosáhly 1950 kg/m^3 .

Z výsledků je zřejmé, že protepované směsi vykazují vždy menších objemových hmotností, kromě popílku aktivovaného silikátovým modulem $M_s = 1$.

5.8.2 Pevnosti neprotepovaných vzorků po 1 dnu

Připravené směsi alkalicky aktivovaných materiálů byly dále v práci testovány na pevnosti po jednom dnu hydratace. Zkoušená tělesa byla podrobena zkouškám pevnosti v tahu za ohybu, tlaku a změřila se jejich objemová hmotnost (Tab. 12).

Tab. 12: Vlastnosti neprotepovaných vzorků po 1 dnu hydratace

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
Silikátový modul [M_s]	1	2	1	2	1	2	1	2
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2340	2260	2050	1890	2140	2140	2120	2190
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	0,5	2,8	0,4	0,3	0,4	0,2	0,1	0
Pevnost v tlaku [MPa]	2	11,9	1,9	nenaměřeno				

Z tabulky je zřejmé, že u zkoušky pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku směsí po jednom dnu hydratace dosáhly nejvyšších hodnot vzorky připravené u vysokopecní

granulované strusky, kde pevnosti v tahu za ohybu dosáhly hodnot 2,8 MPa a pevnosti v tlaku 11,9 MPa. Vzorky I-META a N-META nebyly vlivem nízkých pevností měřitelné (Obr. 4).



Obr. 4: Vzorek tělesa z metakaolinu N-META

5.8.3 Pevnosti protěpovaných vzorků po 1 dni

Připravené směsi alkalicky aktivovaných materiálů byly po namíchání uloženy do klimatické komory, kde setrvaly po dobu 24 hodin při teplotě 80 °C s 90 % vlhkostí. Tyto vzorky zkoušených těles byly před zkouškou odformovány a zjišťovaly se pevnosti po jednom dnu hydratace. Zkoušená tělesa byla podrobena destruktivním zkouškám pevnosti v tahu za ohybu a tlaku. Dále se na jednotlivých vzorcích směsí stanovila objemová hmotnost. Hodnoty výsledných zkoušek protěpovaných vzorků jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Vlastnosti protéplovaných směsí po 1 dnu hydratace

Směs	Vysokopeční granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul [M_s]								
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2230	2310	2070	1930	2120	1990	1990	1910
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	6	8,1	2,3	0,5	0,2	0,3	0,04	0,07
Pevnost v tlaku [MPa]	57,8	97,6	15	4,5	1,4	1,3	0,8	0,7

Nejvyšších hodnot pevností bylo dosaženo u směsi vysokopeční granulované strusky aktivované aktivátorem se silikátovým modulem $M_s = 2$, pevnosti v tahu za ohybu u této receptury činily 8,1 MPa a hodnota pevnosti v tlaku 97,6 MPa. Vzorky metakaolinu N – META vykazovaly minimální hodnoty pevností v tahu i v tlaku.

5.8.4 Pevnosti neprotéplovaných vzorků po 7 dnech

Namíchané směsi byly po 24 hodinách odformovány a poté uloženy do vodní lázně nebo vlhkostní skříň. Vzhled vybraných těles před zkouškou je na Obr. 5 – 8.



Obr. 5: Vzhled těles z popílků a odloupení vnější části



Obr. 6: Vzhled těles z vysokopecní granulované strusky



Obr. 7: Vzhled těles z metakaolinu I-META



Obr. 8: Vzhled těles z metakaolinu N-META

Před zkouškou se zkušební vzorky osušily suchou tkaninou a byly dále změřeny pro stanovení objemové hmotnosti dle kapitoly 5.4.3. Poté byly podrobeny pevnostním zkouškám. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14: Vlastnosti neproteplovaných směsí po 7 dnech hydratace

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul [M_s]								
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2270	2310	2050	2000	2050	2120	2150	2190
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	3,3	6,3	0,4	0,4	0	0,3	0,4	0,4
Pevnost v tlaku [MPa]	18,1	48,9	1,9	1,4	0,6	0,7	0,4	0,4

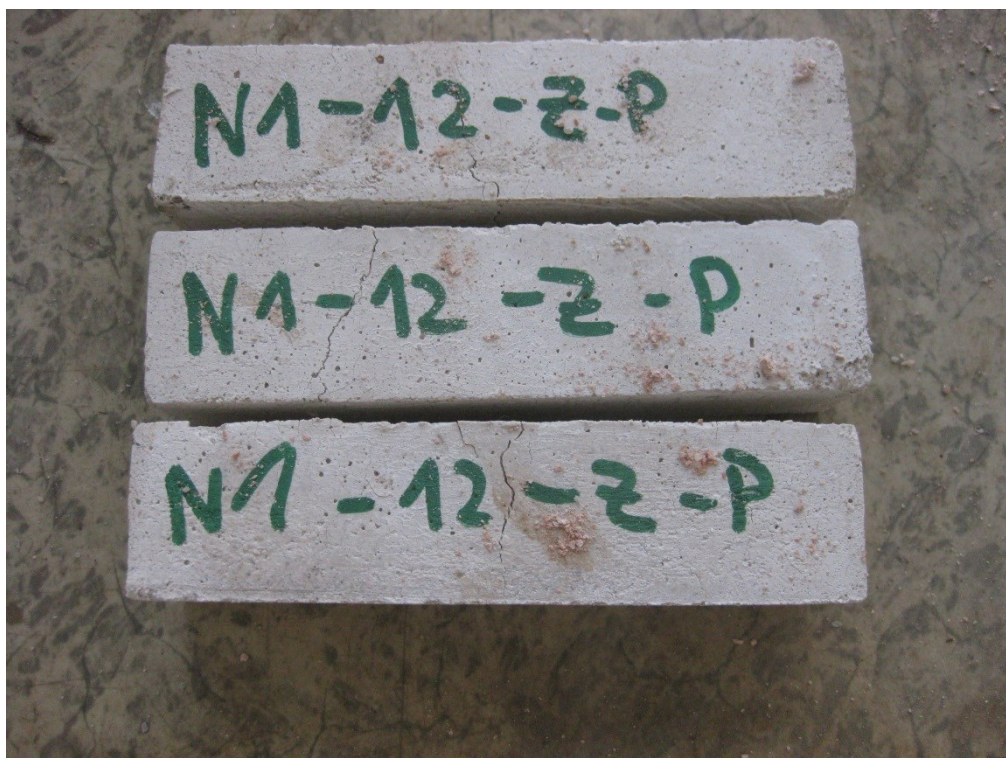
Z výsledků je zřejmé, že nejvyšších pevností po 7 denní hydrataci neproteplovaných vzorků dosahují alkalicky aktivované materiály na bázi vysokopecní granulované strusky. Nejvyšších pevností dosahují tyto vzorky aktivované alkalickým aktivátorem se silikátovým modulem $M_s = 1$, kde nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu je 6,3 MPa, nejvyšší pevnost v tlaku vzorku byla 48,9 MPa.

5.8.5 Pevnosti proteplovaných vzorků po 7 dnech

Zkoušené směsi byly po přípravě uloženy do klimatické komory, kde setrvaly po dobu 24 hodin při teplotě 80 °C a 90 % vlhkosti a poté byly uloženy do vlhkostní skříně nebo do vodní lázně. Směsi po vytáhnutí z klimatické komory vykazovaly pórovitou strukturu, objemové změny byly patrné u těles z metakaolinu I-META (Obr. 9) a z metakaolinu N-META (Obr. 10). U těles z popílku Dětmárovice došlo k odloupení povrchové vrstvy (Obr. 11). Tělesa z vysokopecní granulované strusky jsou uvedeny na Obr. 12.



Obr. 9: Struktura těles z metakaolinu I-META před zkouškou 7 denních pevností



Obr. 10: Výskyt trhlin u těles z metakaolinu N-META před zkouškou 7 denních pevností



Obr. 11: Odloupnutí povrchové vrstvy u těles z popílku Dětmarovice před zkouškou 7 denních pevností



Obr. 12: Vzhled těles z vysokopecní granulované strusky před zkouškou 7 denních pevností

Před zkouškou se zkušební vzorky osušily suchou tkaninou a byly dále změřeny pro stanovení objemové hmotnosti. V další části byly podrobeny pevnostním zkouškám. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 15.

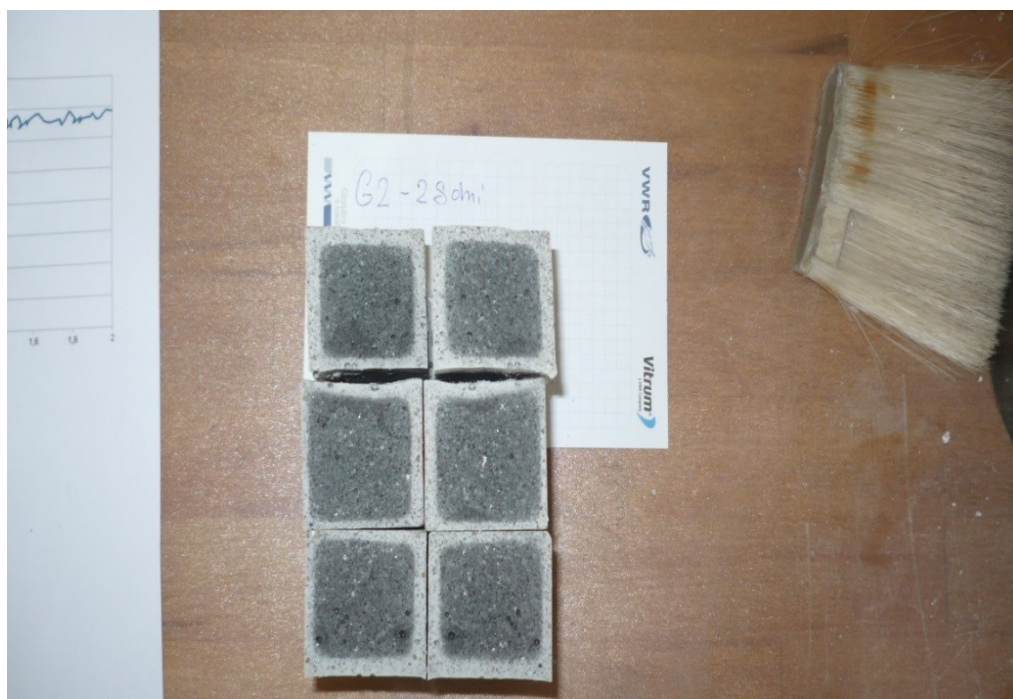
Tab. 15: Vlastnosti protěplováných těles po 7 dnech hydratace

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
Silikátový modul [M_s]	1	2	1	2	1	2	1	2
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2320	2300	2080	1890	1980	1960	2030	1930
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	10,1	7,4	2,4	1,1	0,2	0	0,1	0,03
Pevnost v tlaku [MPa]	78,3	94,6	18,4	2,9	1,5	1,3	0,7	0,6

Z výsledků je zřejmé, že nejvyšších pevností po 7 denní hydrataci protěplováných vzorků dosahují alkalicky aktivované materiály na bázi vysokopecní granulované strusky. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu byly naměřeny u vzorků se silikátovým modulem $M_s = 1$, a to pevnosti 10,1 MPa, a nejvyšší pevnosti v tlaku dosahovaly vzorky aktivované silikátovým modulem $M_s = 2$, a to průměrně 94,6 MPa. U těles připravených z metakaolinu I-META byly pevnosti v tahu ohybem vlivem porušení zkušebních vzorků protěplováním neměřitelné.

5.8.6 Pevnosti neprotěplováných směsí po 28 dnech

Směsi byly uloženy do forem a po 24 hodinách hydratace se provedlo odformování vzorků. Poté byly vzorky uloženy do vlhkostní skříně nebo vodní lázně. Další částí bylo stanovení pevnostních vlastností. Stanovily se pevnosti v tlaku a tahu za ohybu. Vzhled jednotlivých těles je na Obr. 13 - 16. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v Tab. 16.



Obr. 13: Vzhled těles z vysokopecní granulované strusky po zkoušce pevnosti v tahu ohybem



Obr. 14: Vzhled těles z popílku po zkoušce pevnosti v tahu ohybem



Obr. 15: Vzhled těles z metakaolinu I-META po zkoušce pevnosti v tahu ohybem



Obr. 16: Vzhled těles z metakaolinu N-META po zkoušce pevnosti v tahu ohybem

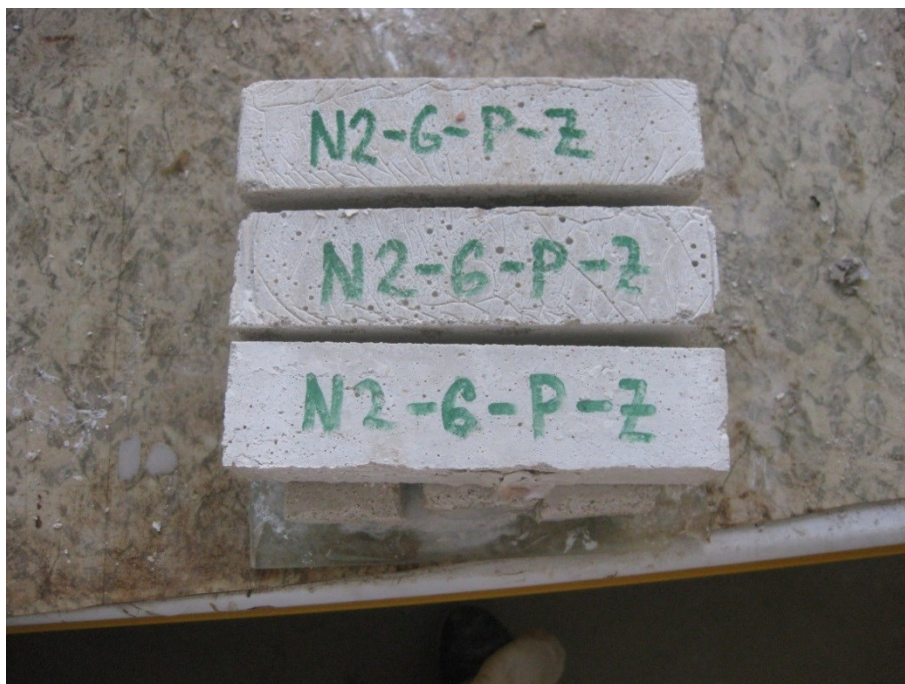
Tab. 16: Naměřené hodnoty u směsí po 28 dnech hydratace

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
Silikátový modul [M_s]	1	2	1	2	1	2	1	2
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2370	2360	2020	2020	2090	2060	2050	2050
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	5,5	10	0,8	0,5	0,4	0,3	0,7	0,8
Pevnost v tlaku [MPa]	41,5	73,3	2,4	1,6	1,1	0,9	0,4	0,9

Nejvyšších pevností dosáhly vzorky z vysokopecní granulované strusky se silikátovým modulem $M_s = 2$. Tyto vzorky dosahovaly hodnot 10 MPa pevnosti v tahu za ohybu a 73,3 MPa pevnosti v tlaku. Nejnižší pevnosti v tahu za ohybu vykazují vzorky metakaolinu I-META se silikátovým modulem $M_s = 2$, a to hodnoty 0,3 MPa, a nejnižší pevnosti v tlaku 0,4 MPa měly vzorky metakaolinu N-META.

5.8.7 Pevnosti protěpovaných vzorků po 28 dnech

Připravené směsi byly vzorky alkalicky aktivovaných materiálů uloženy do klimatické komory, kde setrvaly po dobu 24 hodin při teplotě 80 °C a 90 % vlhkosti a poté byly uloženy do vlhkostní skříně nebo vodní lázně. Vzhled těles je vyobrazen na Obr. 17 - 21.



Obr. 17: Vzhled proteplovaných vzorků N-META před zkouškou 28 denních pevností



Obr. 18: Vzhled proteplovaných vzorků vysokopecní granulované strusky před zkouškou 28 denních pevností



Obr. 19: Vzhled proteplovaných vzorků popílku Dětmarovice před zkouškou 28 denních pevností



Obr. 20: Vzhled proteplovaných vzorků I-META před zkouškou 28 denních pevností



Obr. 21: Vzhled proteplováných vzorků I-META po zkoušce pevnosti v tahu ohybem po 28 denních hydrataci

Před zkouškou pevnosti se zkušební vzorky osušily suchou tkaninou a byly dále změřeny pro stanovení objemové hmotnosti. V další části byly podrobeny pevnostním zkouškám. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17: Naměřené hodnoty proteplováných směsí po 28 dnech hydratace

Směs	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek Dětmárovice		Metakaolin I-META		Metakaolin N-META	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Silikátový modul $[M_s]$								
Objemová hmotnost $[kg/m^3]$	2280	2250	2080	2050	1990	1910	2030	2050
Pevnost v tahu za ohybu $[MPa]$	8,9	7,4	2,9	1,7	0,2	0,3	0	0,1
Pevnost v tlaku $[MPa]$	70,5	53,5	11,2	8	1,3	1,1	0,3	0,8

Ze získaných hodnot je zřejmé, že nejvyšších pevností 28 denní hydratace protetpovaných vzorků dosahují alkalicky aktivované materiály na bázi vysokopecní granulované strusky se silikátovým modulem $M_s = 1$. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu 8,9 MPa a nejvyšší pevnosti v tlaku 70,5 MPa.

5.8.8 Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost byla ověřena dle normy ČSN 72 2452. Tato zkouška byla provedena na připravených zkušebních tělesech po 28 dnech zrání, a to na protetpovaných a neprotetpovaných tělesech. Jako porovnávací vzorky byly použity pevnosti těles po 28 dnech zrání.

Již během prvních 4 – 6 zmrazovacích cyklů došlo k totálnímu rozpadu většiny připravených těles. Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti byly tedy vyhodnoceny jen pro vzorky, u kterých nedošlo k destrukci, a tyto jsou uvedeny v Tab. 18 pro neprotetpované a v Tab. 19 pro protetpované směsi. Vzhled těles v průběhu zkoušky je zachycen na Obr. 22 – 25.

Tab. 18: Mrazuvzdornost neprotetpovaných vzorků po 100 cyklech zkoušky

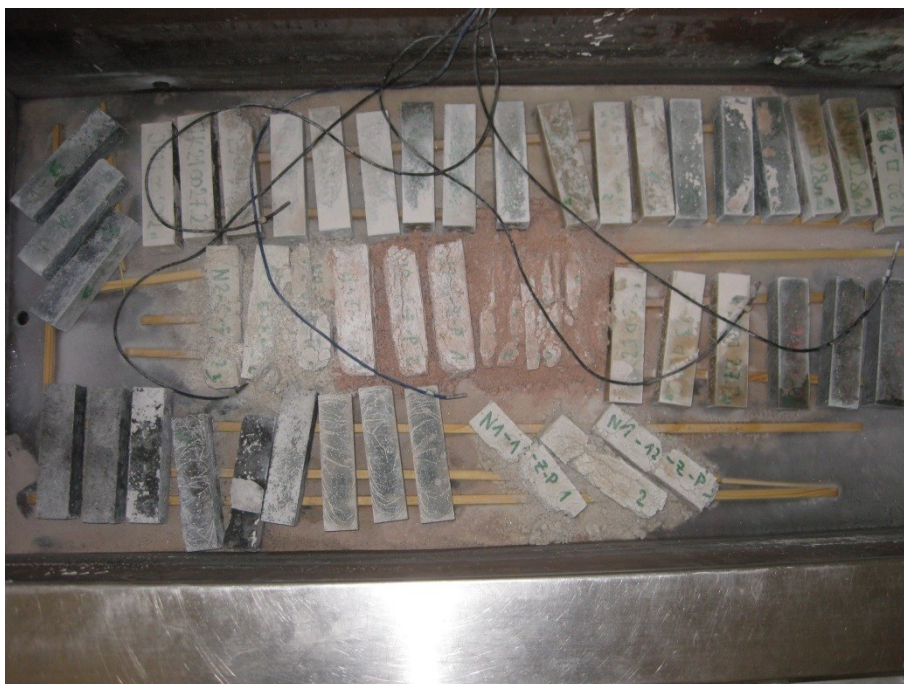
Vzorek	Vysokopecní granulovaná struska	
	1	2
Silikátový modul		
Pevnost v tlaku porovnávací [MPa]	41,5	73,3
Pevnost v tlaku po zkoušce [MPa]	19,9	88
Součinitel mrazuvzdornosti	0,48	1,00
Pevnost v tahu za ohybu porovnávací [MPa]	5,5	10
Pevnost v tahu za ohybu po zkoušce [MPa]	7	9,1
Součinitel mrazuvzdornosti	1,00	0,91
Hmotnost porovnávací [kg]	1,782	1,786
Hmotnost po zkoušce [kg]	1,353	1,786
Úbytek hmotnosti [%]	24	0,00

Tab. 19: Mrazuvzdornost proteplovaných vzorků po 80 cyklech zkoušky

Vzorek	Vysokopecní granulovaná struska		Popílek
Silikátový modul	1	2	1
Pevnost v tlaku porovnávací [MPa]	70,5	53,5	11,2
Pevnost v tlaku po zkoušce [MPa]	76,5	63,3	12,2
Součinitel mrazuvzdornosti	1,00	1,00	1,00
Pevnost v tahu za ohybu porovnávací [MPa]	8,9	7,4	2,9
Pevnost v tahu za ohybu po zkoušce [MPa]	8,1	7	1,7
Součinitel mrazuvzdornosti	0,91	0,95	0,59
Hmotnost porovnávací [kg]	1,8	1,756	1,643
Hmotnost po zkoušce [kg]	1,796	1,708	1,602
Úbytek hmotnosti[%]	0,22	2,73	2,50



Obr. 22: Porušení neproteplováných vzorků vlivem zmrazování a rozmrazování



Obr. 23: Porušení proteplovaných vzorků vlivem zmrazování a rozmrazování



Obr. 24: Porušení vzorku vysokopecní granulované strusky $M_s = 1$



Obr. 25: Neporušený vzorek vysokopecní granulované strusky $M_s = 2$

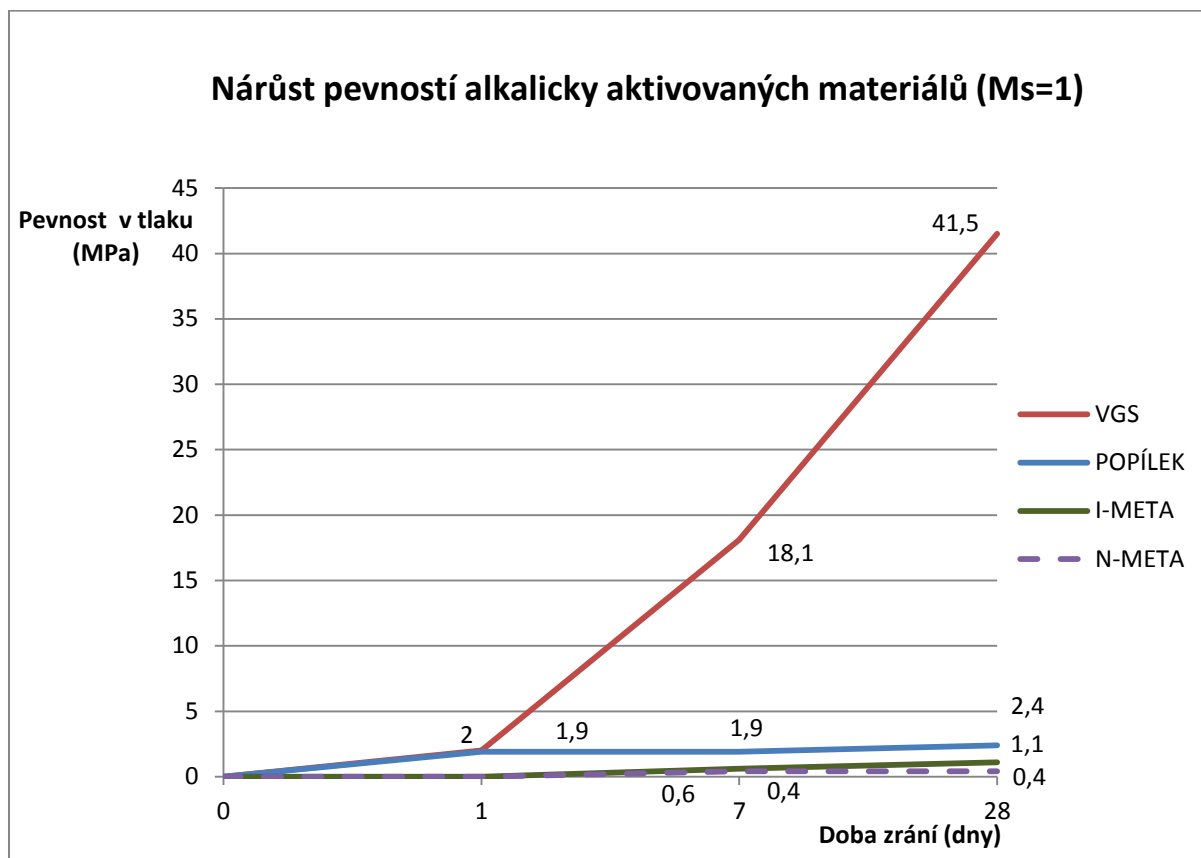
5.9 Vyhodnocení výsledků a možné uplatnění ve stavebnictví

V této kapitole jsou provedena vyhodnocení naměřených hodnot především pomocí grafického znázornění výsledků. Rovněž je zde zmíněna možnost uplatnění použitých systémů ve stavebnictví.

5.9.1 Nárůst pevností v tlaku u neprotepovaných vzorků

Nárůst pevností v tlaku po 1, 7 a 28 dnech hydratace u neprotepovaných vzorků aktivovaných silikátovým modulem $M_s = 1$ je uveden na grafu Obr. 26 (Tab. 20). Z uvedeného obrázku vyplývá, že alkalicky aktivované materiály na bázi vysokopecní granulované strusky vykazují po 28 dnech hydratace největších pevností v tlaku, a to až 41,5

MPa. Naopak nejmenších naměřených pevností dosahuje metakaolin N-META, který dosáhl po 28 dnech hydratace pevnosti 0,4 MPa.

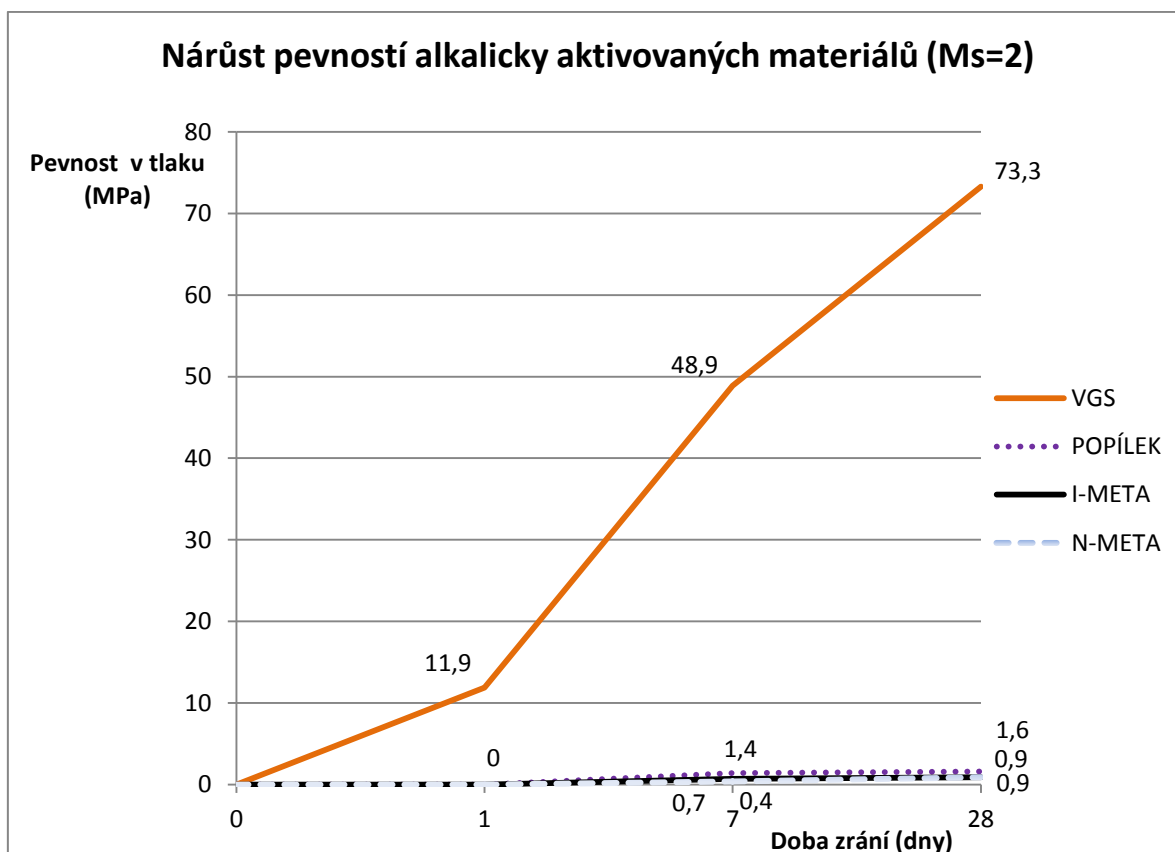


Obr. 26: Graf nárůstu pevností v tlaku těles ($M_s = 1$) neproteplovaných vzorků

Tab. 20: Vstupní údaje grafického vyhodnocení neproteplovaných vzorků ($M_s = 1$)

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tlaku po 1 dni [MPa]	2	1,9	0	0
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	18,1	1,9	0,6	0,4
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	41,5	2,4	1,1	0,4

Vývoj pevností v tlaku pro vzorky aktivované silikátovým modulem $M_s = 2$ je znázorněn na grafu viz Obr. 27 (Tab. 21). Zde je patrné, že vysokopecní granulovaná struska dosahuje pevností v tlaku až 73,3 MPa. Nejmenších pevností po 28 dnech hydratace vykazují vzorky metakaolínu N-META a I-META, jejich pevnosti dosahují pouze 0,9 MPa.



Obr. 27: Graf nárůstu pevností v tlaku těles ($M_s = 2$) neproteplovaných vzorků

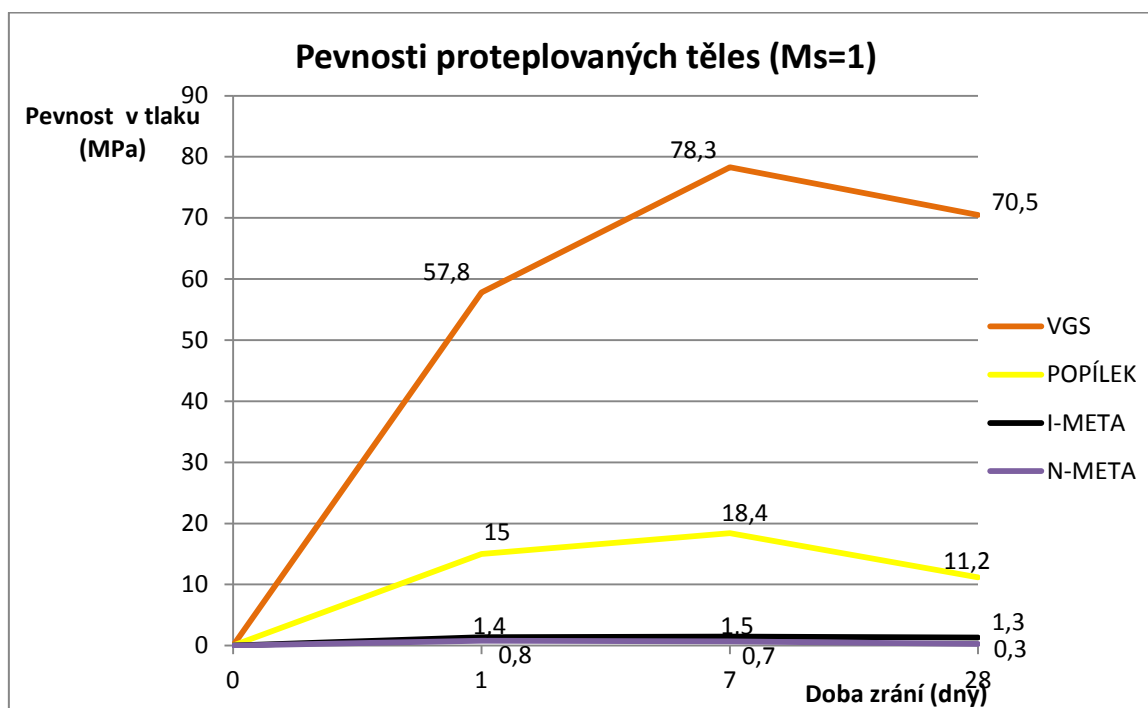
Tab. 21: Vstupní údaje grafického vyhodnocení neproteplovaných vzorků ($M_s = 2$)

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tlaku po 1 dni [MPa]	11,9	0	0	0
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	48,9	1,4	0,7	0,4
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	73,3	1,6	0,9	0,9

5.9.2 Vývoj pevností v tlaku u proteplovaných vzorků

Vývoj pevností u proteplovaných vzorků aktivovaných alkalickým aktivátorem se silikátovým modulem $M_s = 1$ je uveden na grafu Obr. 28 (Tab. 22). Graf zobrazuje zajímavý

trend v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů, kdy jsou z dosud nevysvětlených příčin počáteční pevnosti protěplováných těles vyšší, než pevnosti měřené po 28 dnech zrání. Největších pevností dosahují vzorky vysokopecní granulované strusky. Nejmenší pevnost 0,3 MPa dosahuje vzorek metakaolinu N-META.

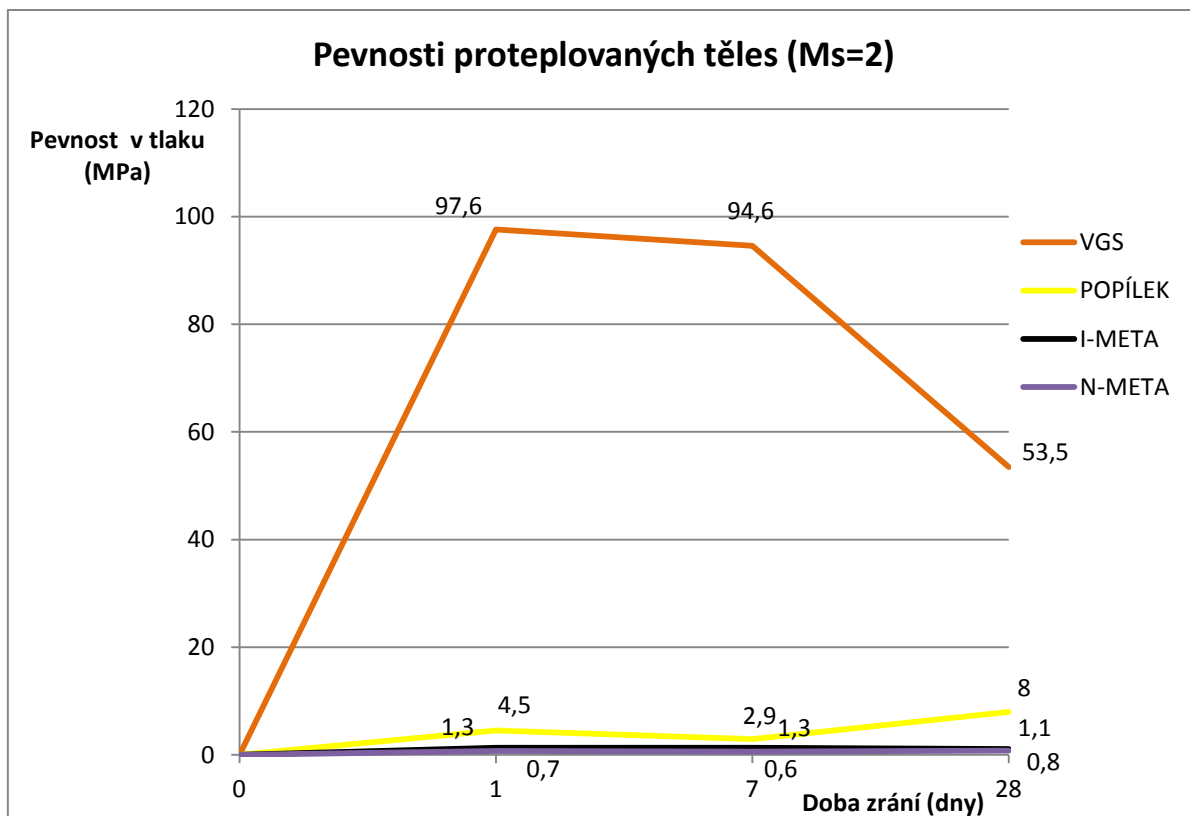


Obr. 28: Vývoj pevností v tlaku protěplováných vzorků (Ms = 1)

Tab. 22: Vstupní údaje grafického vyhodnocení protěplováných vzorků (Ms = 1)

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tlaku po 1 dni [MPa]	57,8	15	1,4	0,8
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	78,3	18,4	1,5	0,7
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	70,5	11,2	1,3	0,3

Na grafu Obr. 29 (Tab. 23) je znázorněn vývoj pevností u protěplováných těles s aktivátorem se silikátovým modulem $M_s = 2$. I na tomto obrázku je zřejmý počáteční prudký nárůst pevností a poté postupný pokles v závislosti na stáří vzorků.



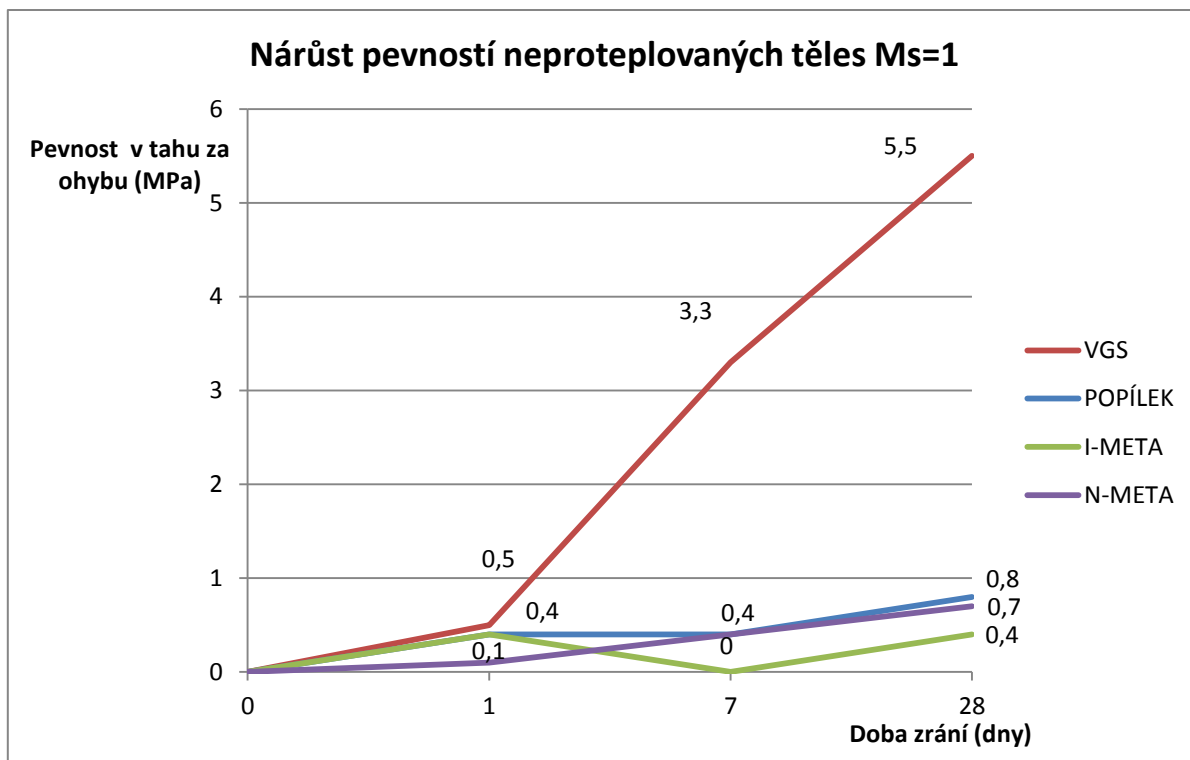
Obr. 29: Vývoj pevností proteplovaných vzorků (Ms = 2)

Tab. 23: Vstupní údaje grafického vyhodnocení proteplovaných vzorků (Ms = 2)

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tlaku po 1 dni [MPa]	97,6	4,5	1,3	0,7
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	94,6	2,9	1,3	0,6
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	53,5	8	1,1	0,8

5.9.3 Nárůst pevností v tahu za ohybu u neproteplovaných vzorků

Vývoj pevností v tahu za ohybu těles s Ms = 1 je uveden na Obr. 30 (viz Tab. 24). Z grafu je patrné, že největších pevností dosahují vzorky vysokopecní granulované strusky. Naopak nejnižších pevností dosahují vzorky metakaolinu I-META.

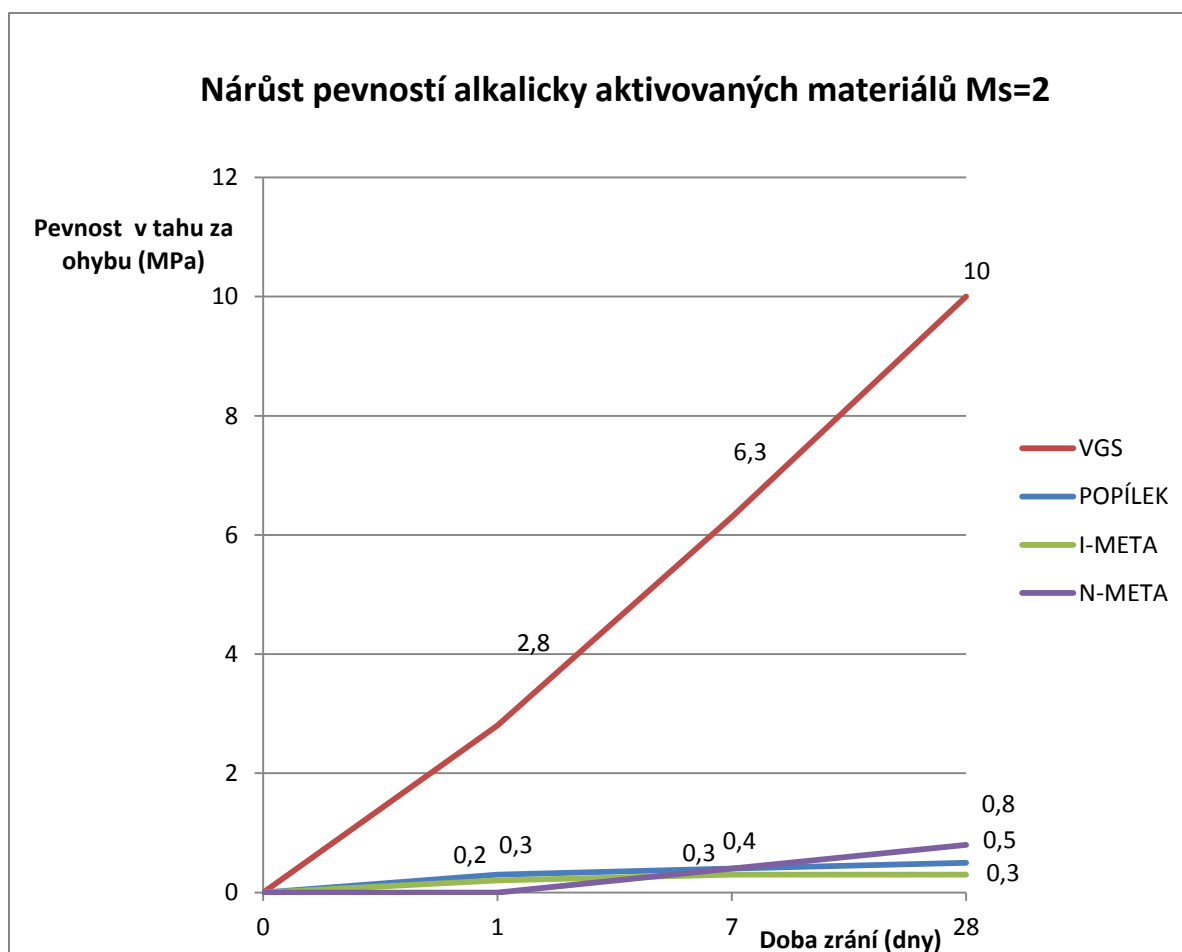


Obr. 30: Vývoj pevností v tahu za ohybu neproteplovaných vzorků ($M_s = 1$)

Tab. 24: Vstupní údaje grafického vyhodnocení neproteplovaných vzorků ($M_s = 1$)

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tahu za ohybu po 1 dni [MPa]	0,5	0,4	0,4	0,1
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	3,3	0,4	0	0,4
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	5,5	0,8	0,4	0,7

Vývoj pevností v tahu za ohybu těles s $M_s = 2$ je uveden na Obr. 31 (viz Tab. 25). Z grafu je patrné že největších pevností dosahují vzorky vysokopecní granulované strusky.



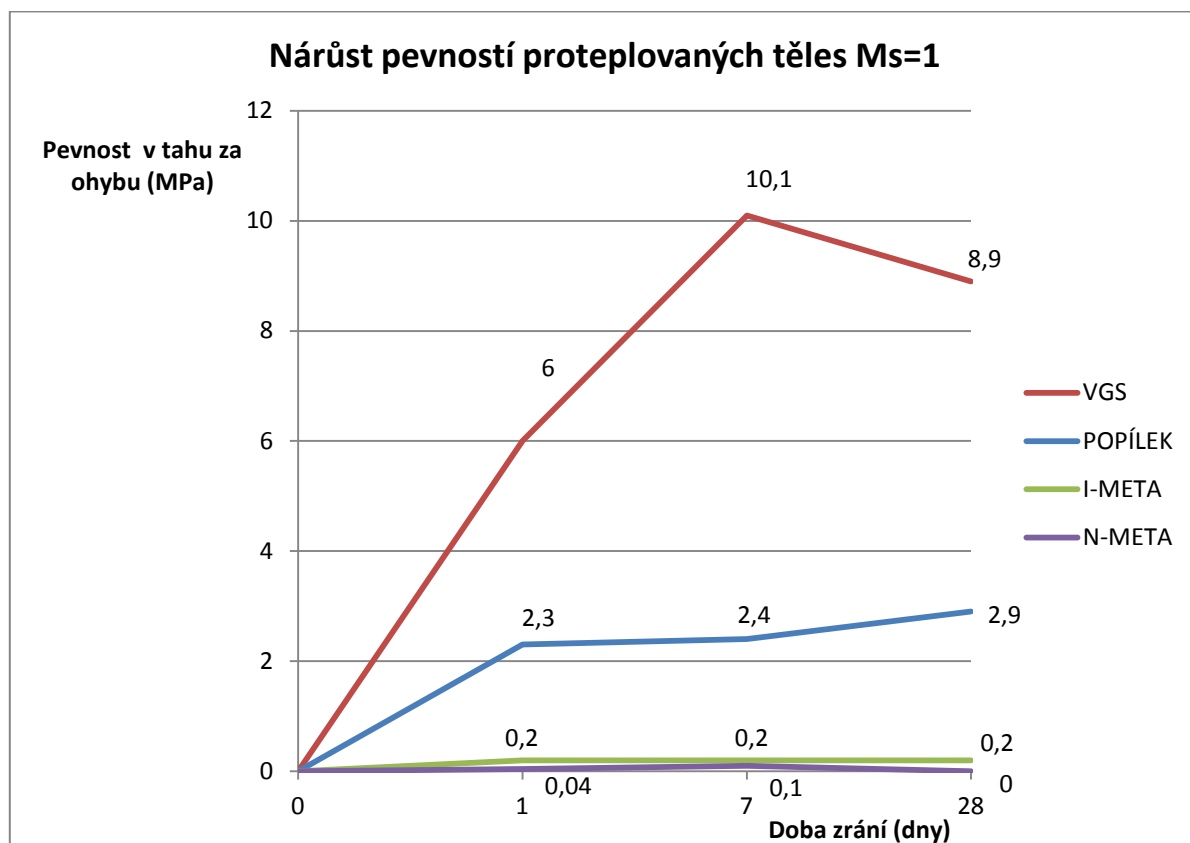
Obr. 31: Graf nárůstu pevností v tahu za ohybu neproteplovaných vzorků ($M_s = 2$)

Tab. 25: Vstupní údaje grafického vyhodnocení neproteplovaných vzorků ($M_s = 2$)

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tahu za ohybu po 1 dni [MPa]	2,8	0,3	0,2	0
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	6,3	0,4	0,3	0,4
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	10	0,5	0,3	0,8

5.9.4 Nárůst pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu

Vývoj pevností v tahu za ohybu proteplovaných vzorků ($M_s = 1$) je uveden na Obr. 32 (Tab. 26). Z grafu je patrné, že největších pevností dosahují vzorky vysokopecní granulované strusky.

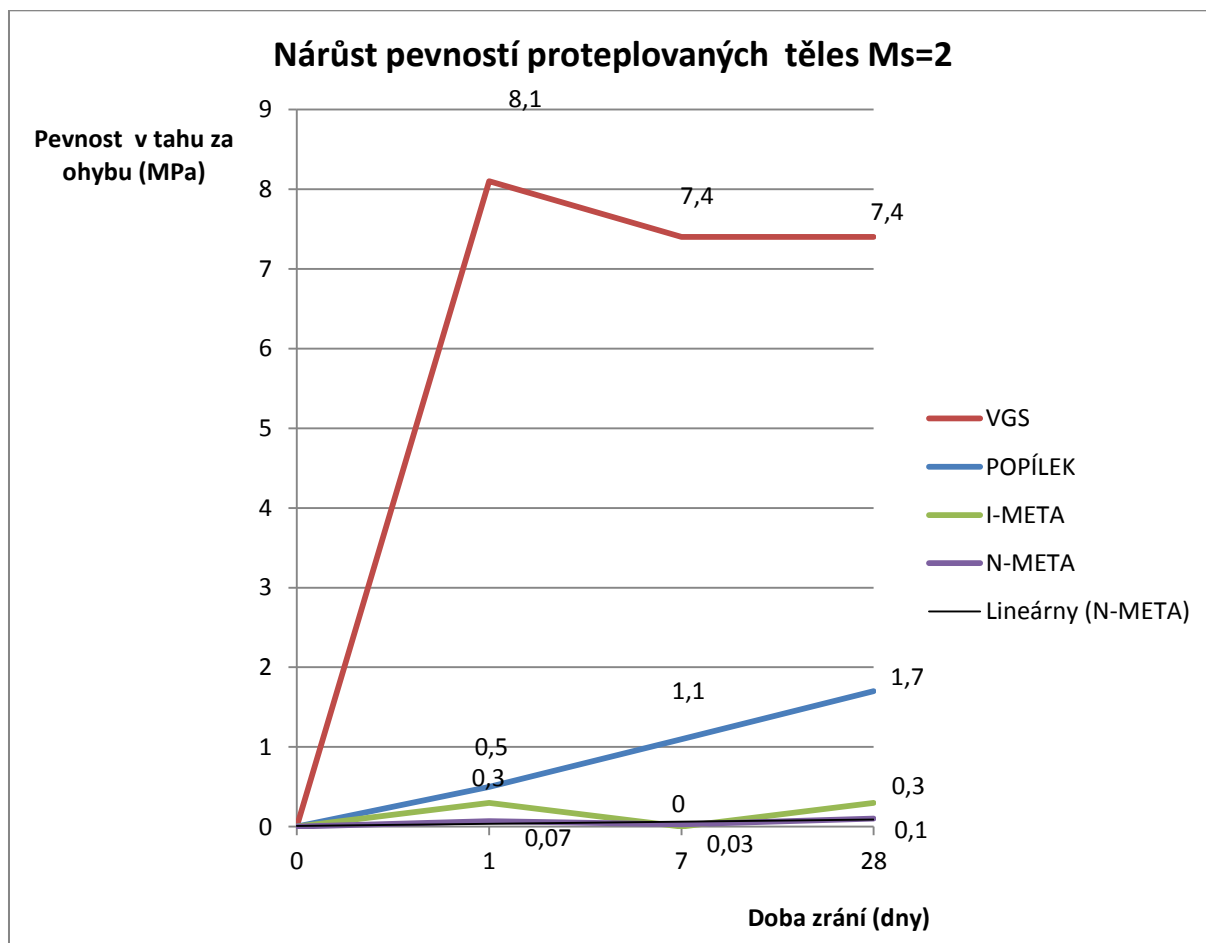


Obr. 32: Graf vývoje pevností v tahu za ohybu proteplovaných vzorků ($M_s = 1$)

Tab. 26: Vstupní údaje grafického vyhodnocení proteplovaných vzorků $M_s = 1$

Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tahu za ohybu po 1 dni [MPa]	6	2,3	0,2	0,04
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	10,1	2,4	0,2	0,1
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	8,9	2,9	0,2	0

Vývoj pevností v tahu za ohybu proteplovaných vzorků ($M_s = 2$) je uveden na Obr. 33 (Tab. 27). Z grafu je patrný především prudký nárůst počátečních pevností u těles z vysokopecní granulované strusky.



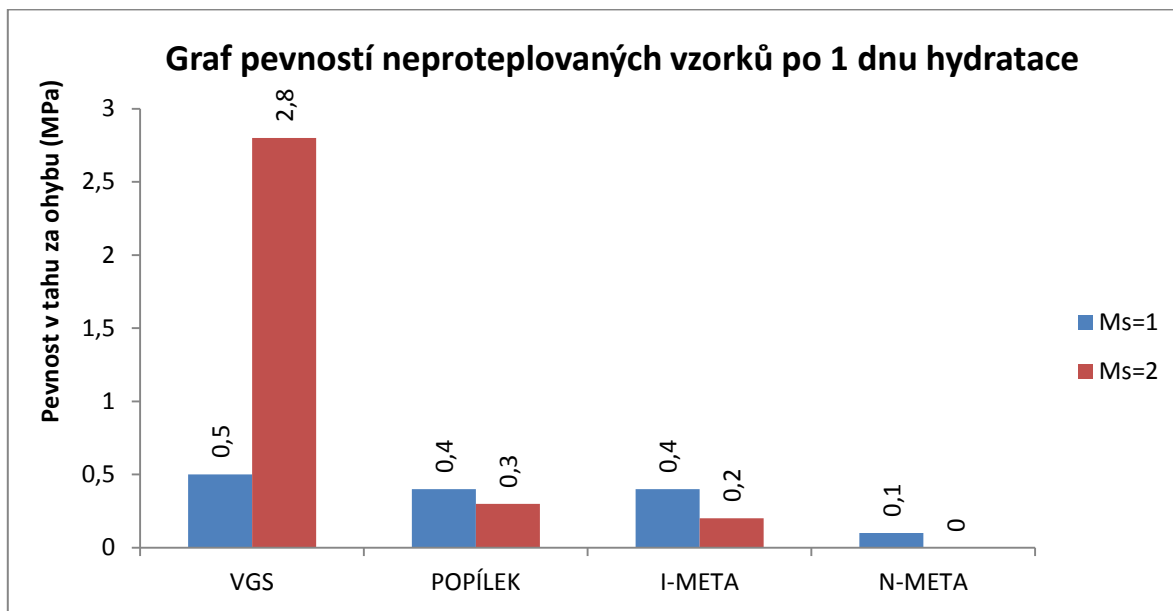
Obr. 33: Graf vývoje pevností v tahu za ohybu proteplovaných vzorků ($M_s = 2$)

Tab. 27: Vstupní údaje grafického vyhodnocení proteplovaných vzorků ($M_s = 2$)

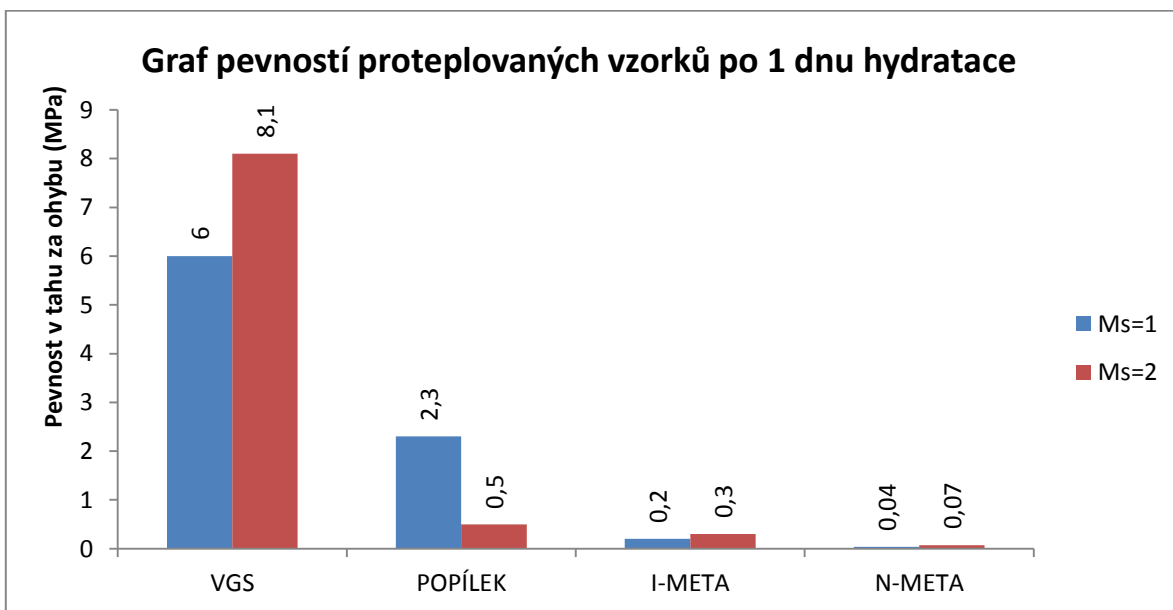
Záměs	VGS	POPÍLEK	I-META	N-META
Pevnost v tahu za ohybu po 1 dni [MPa]	8,1	0,5	0,3	0,07
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	7,4	1,1	0	0,03
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	7,4	1,7	0,3	0,1

5.9.5 Grafické porovnání pevností v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání

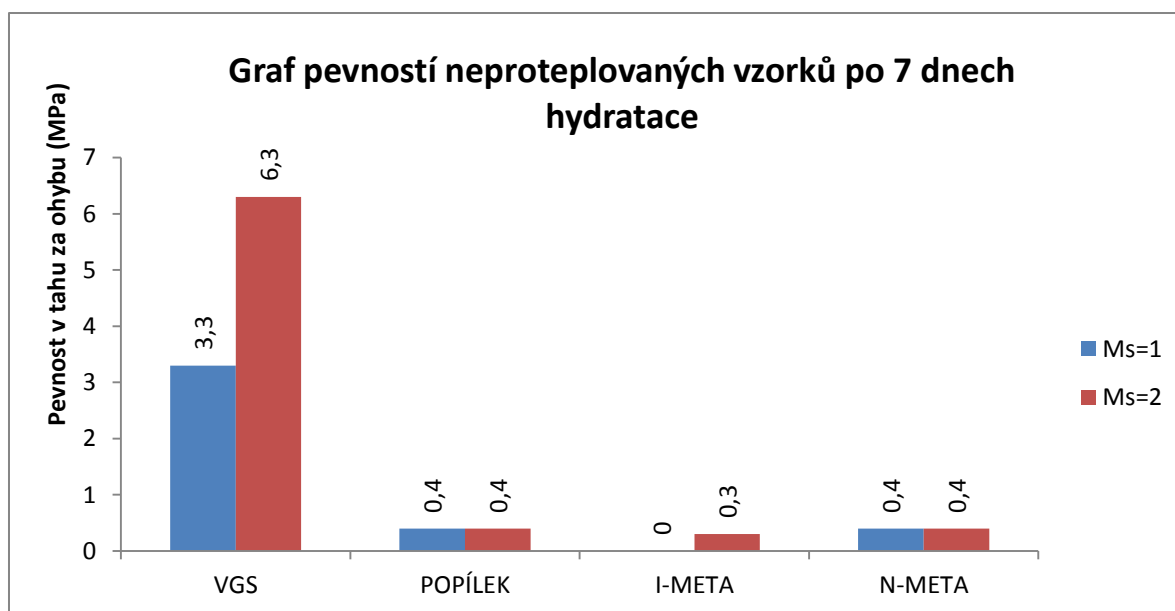
Na Obr. 34 - 39 jsou graficky znázorněny pevnosti v tahu za ohybu neproteplovaných a proteplovaných vzorků jednotlivých směsí po 1, 7 a 28 dnech hydratace. Porovnávají jsou vždy směsi s aktivátorem $M_s = 1$ a $M_s = 2$.



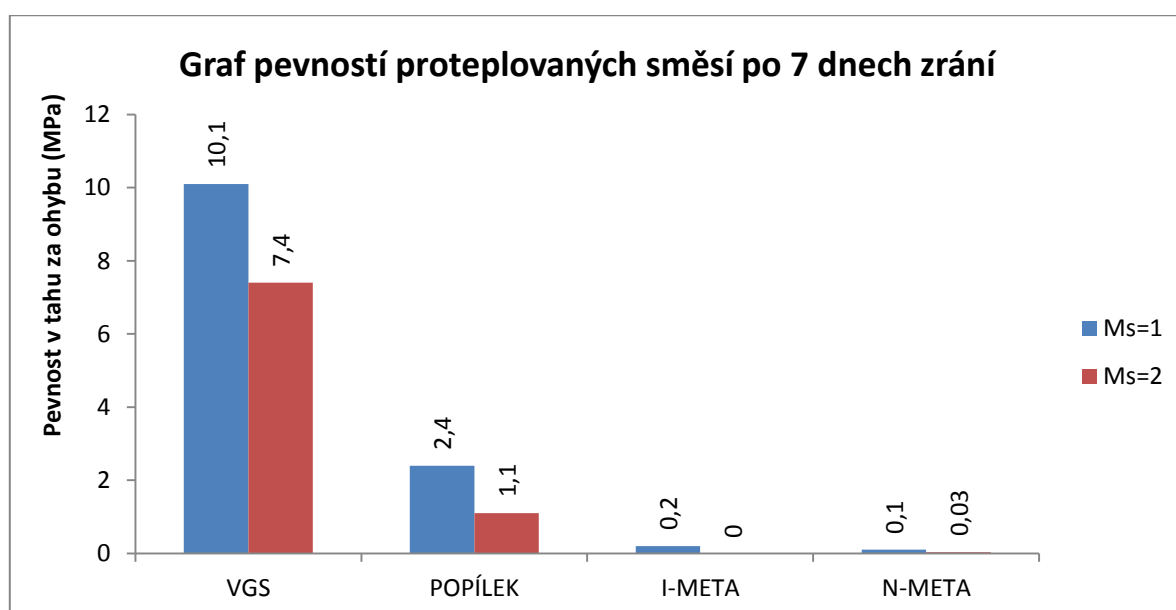
Obr. 34: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 1 dnu hydratace



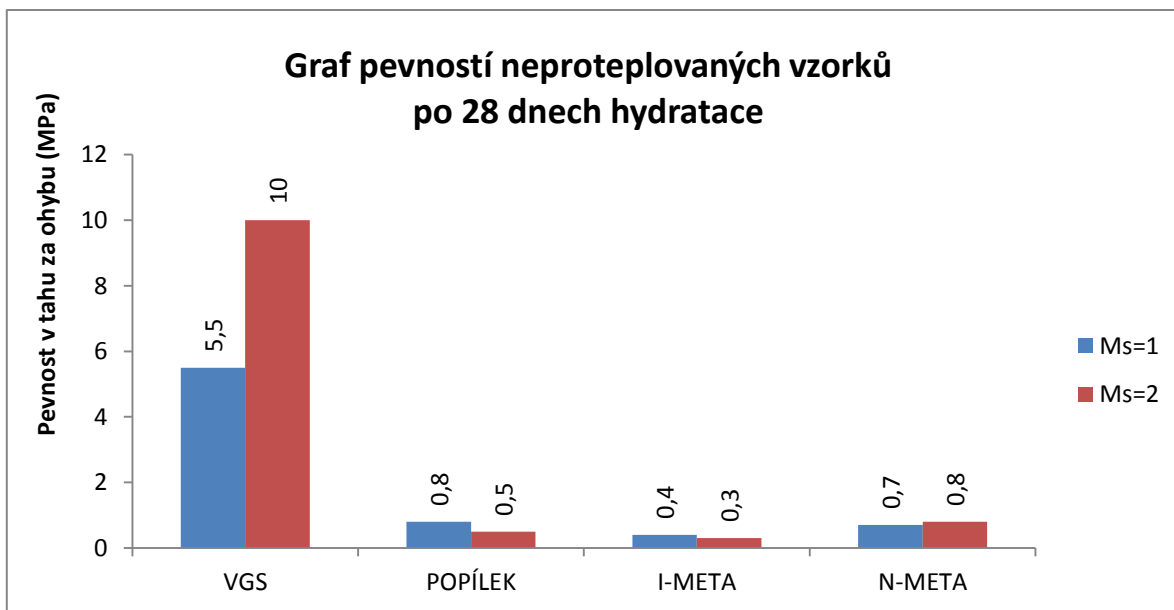
Obr. 35: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 1 dnu hydratace



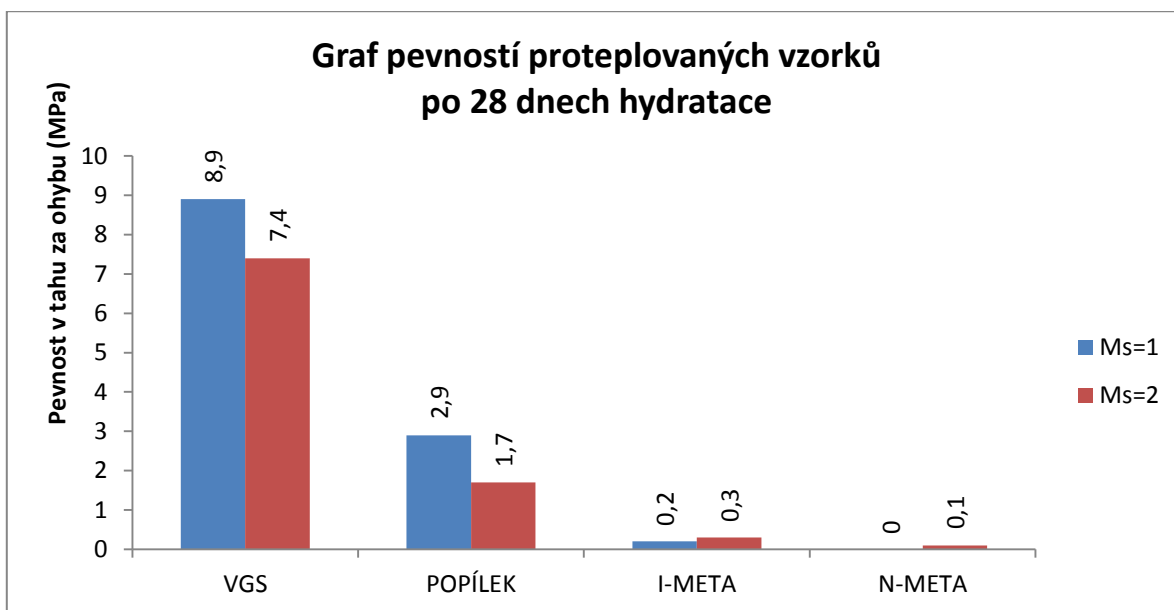
Obr. 36: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace



Obr. 37: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace



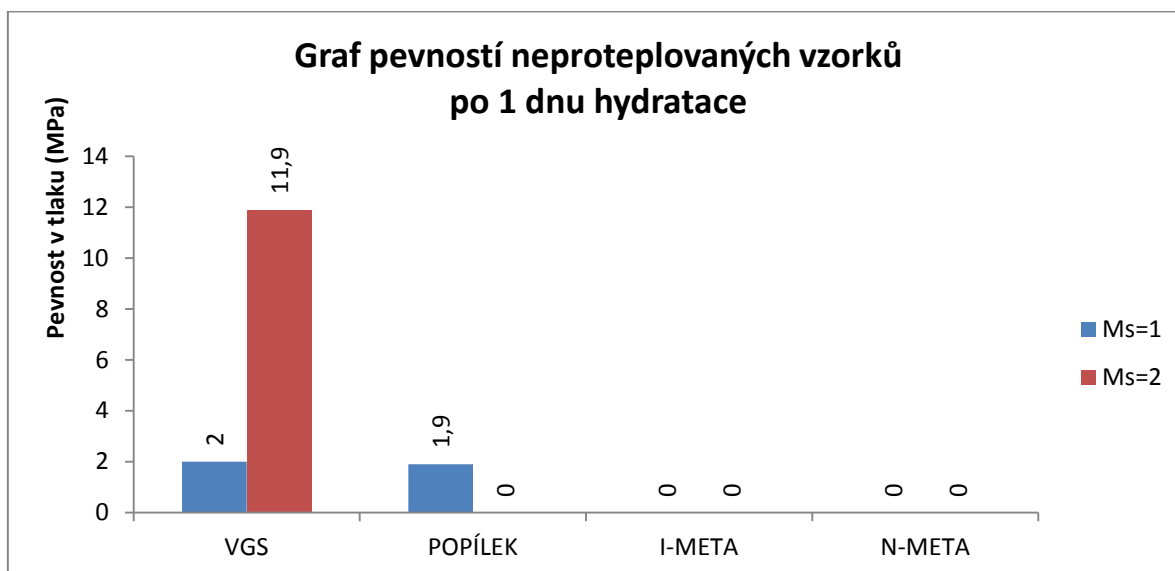
Obr. 38: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace



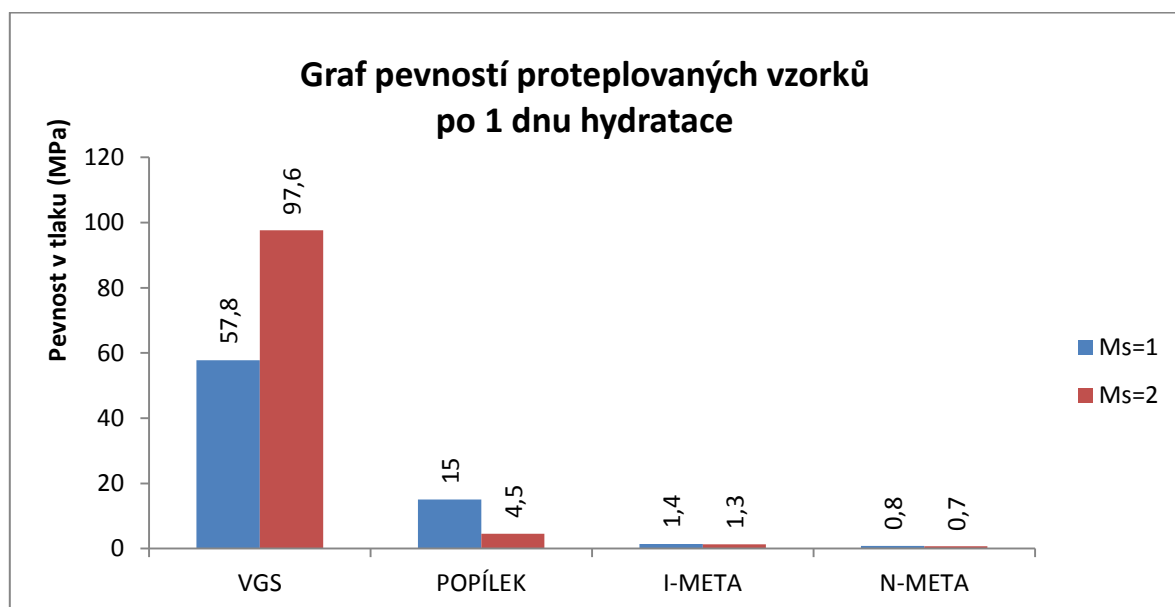
Obr. 39: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace

5.9.6 Grafické porovnání pevností v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání

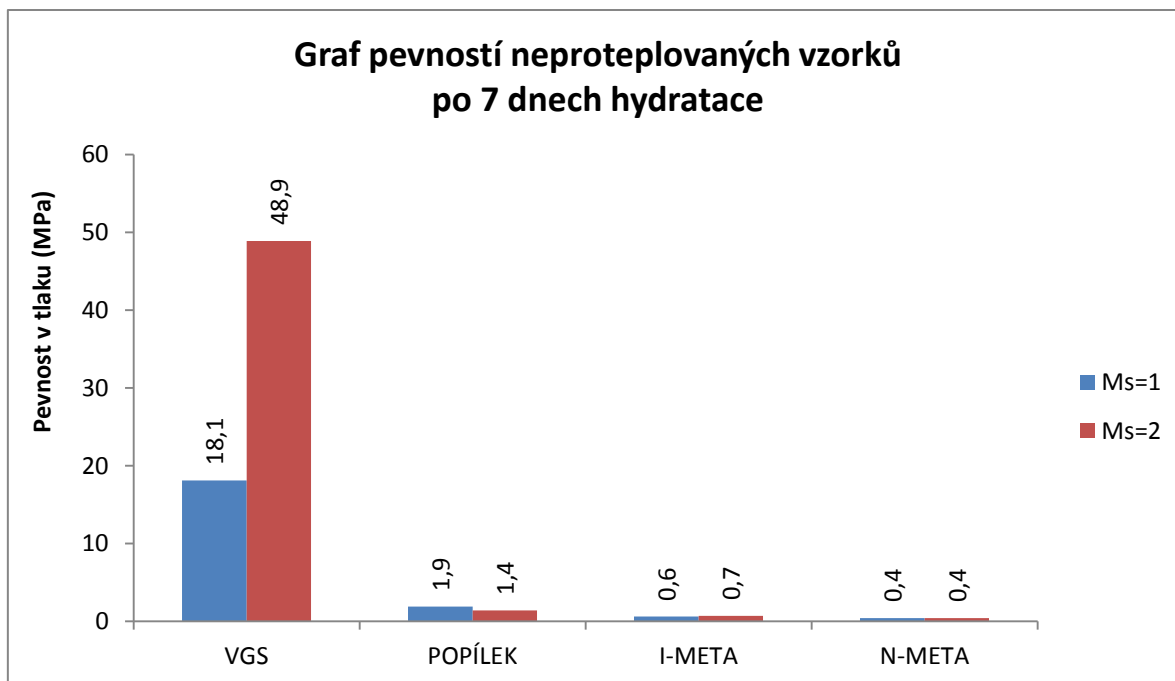
Grafické porovnání pevností v tlaku neproteplovaných i proteplovaných vzorků jednotlivých směsí po 1, 7 a 28 dnech je zobrazeno na Ob. 40 – 45. Porovnávacím kritériem je aktivátor $M_s = 1$ a $M_s = 2$.



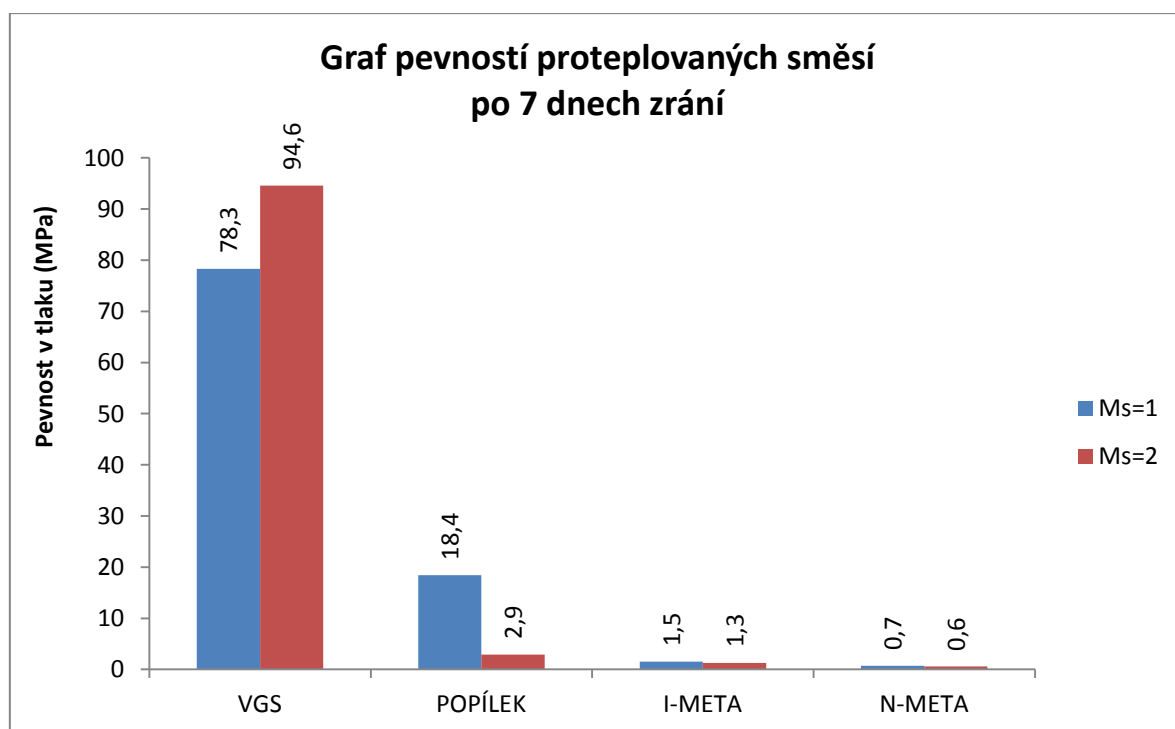
Obr. 40: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tlaku po 1 dnu hydratace



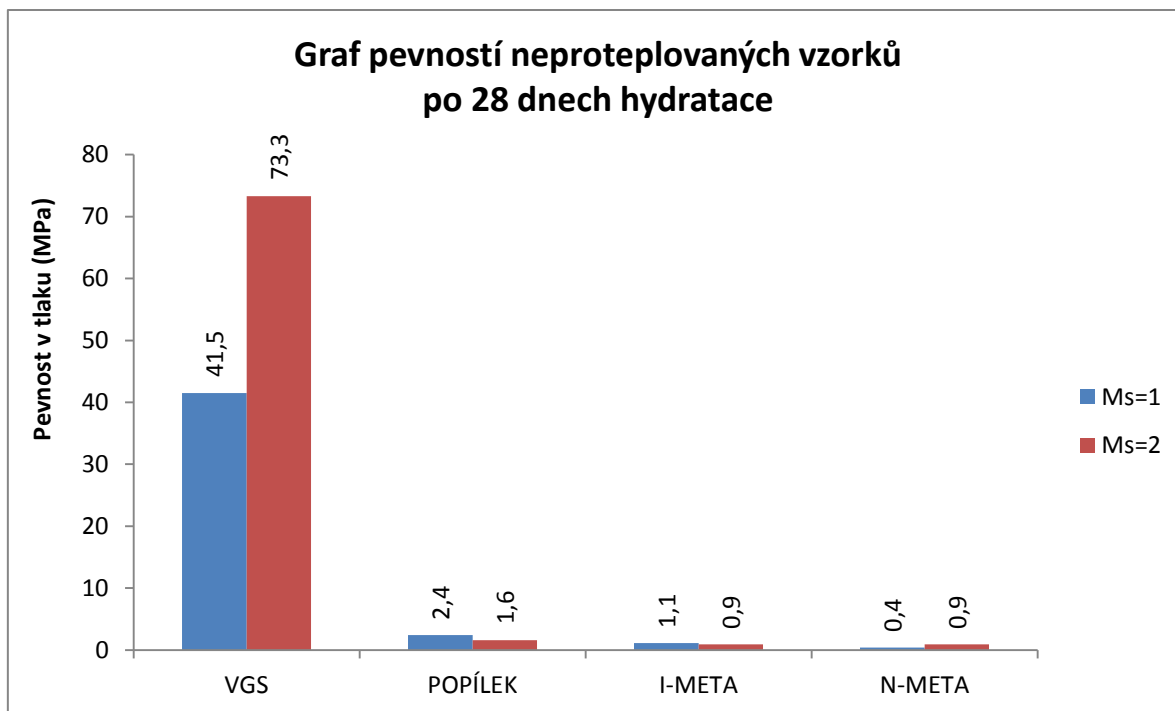
Obr. 41: Graf pevností proteplovaných vzorků v tlaku po 1 dnu hydratace



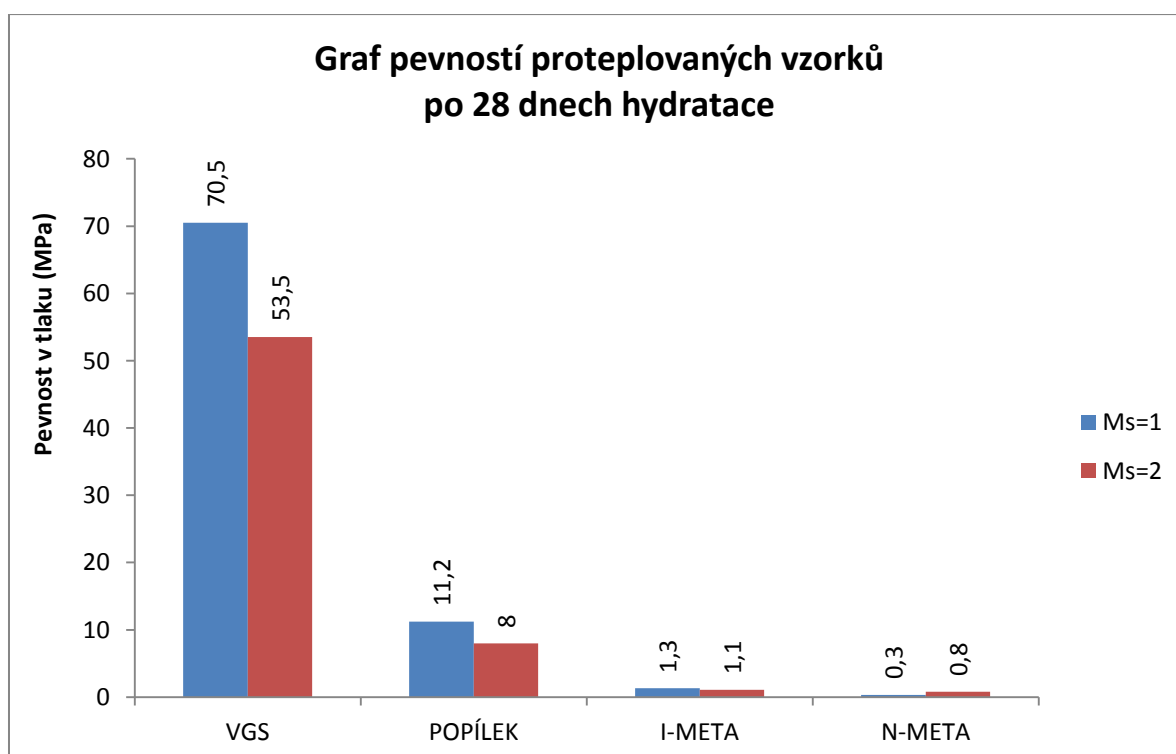
Obr. 42: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace



Obr. 43: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace



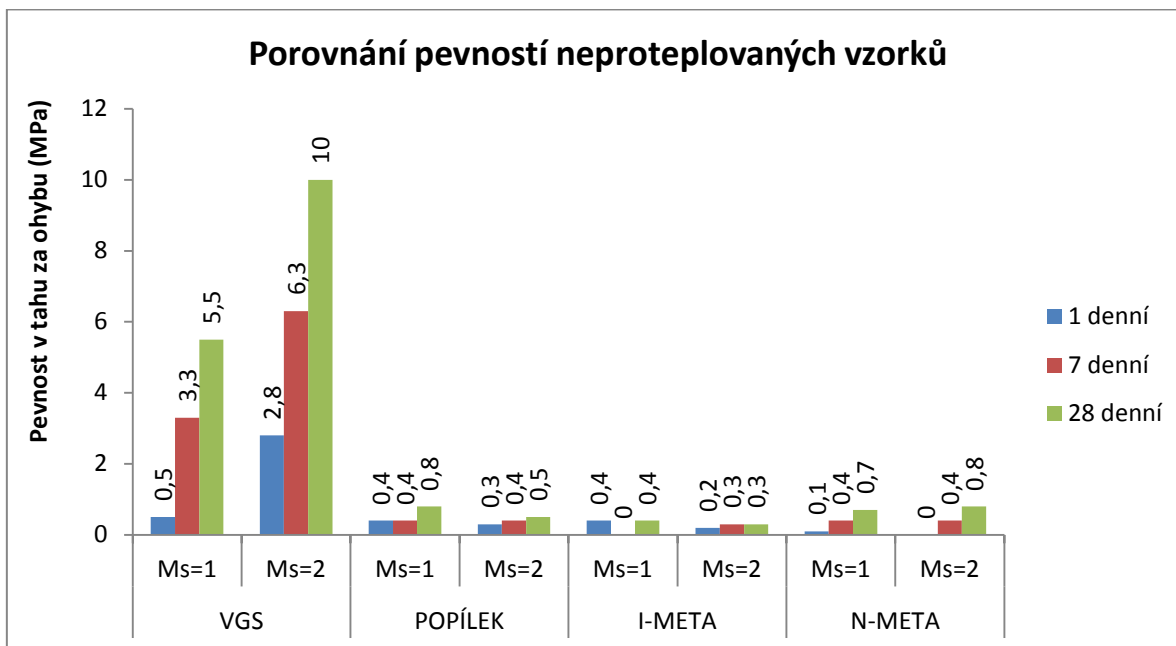
Obr. 44: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace



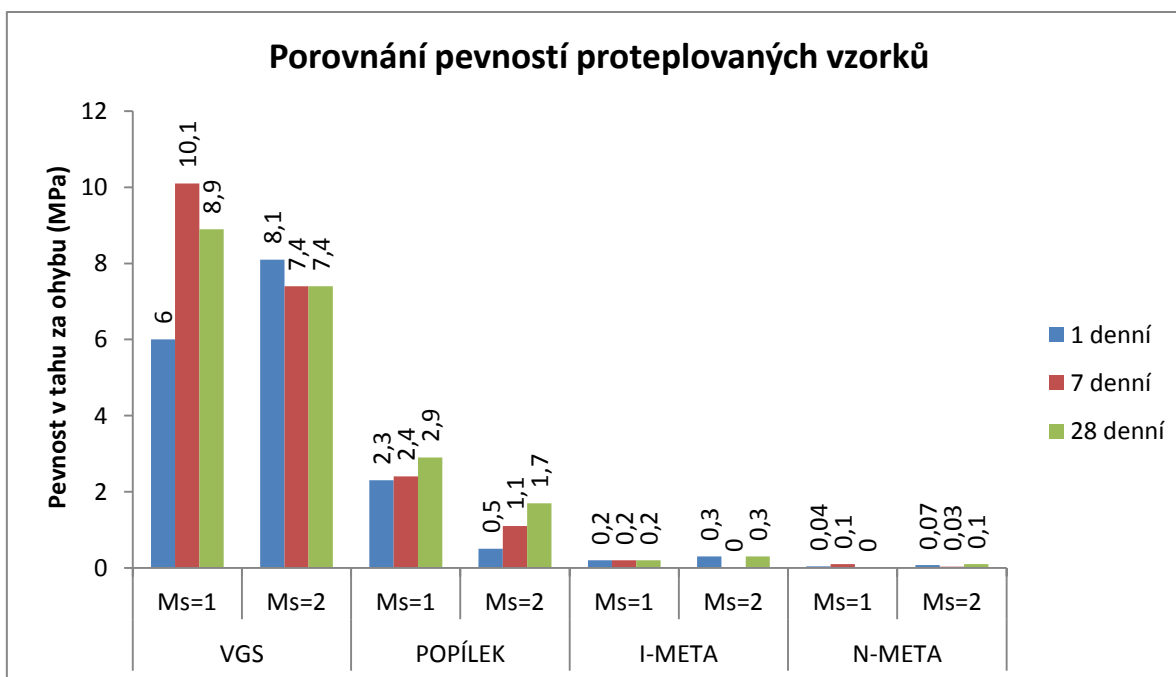
Obr. 45: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace

5.9.7 Porovnání pevností v tahu za ohybu

Grafické porovnání pevností v tahu za ohybu neproteplovaných a proteplovaných vzorků jednotlivých směsí vstupních surovin po 1, 7 a 28 dnech hydratace s různým alkalickým aktivátorem $M_s = 1$ a $M_s = 2$ jsou uvedené na Obr. 46 a 47.



Obr. 46: Srovnání pevností v tahu za ohybu u neproteplovaných vzorků

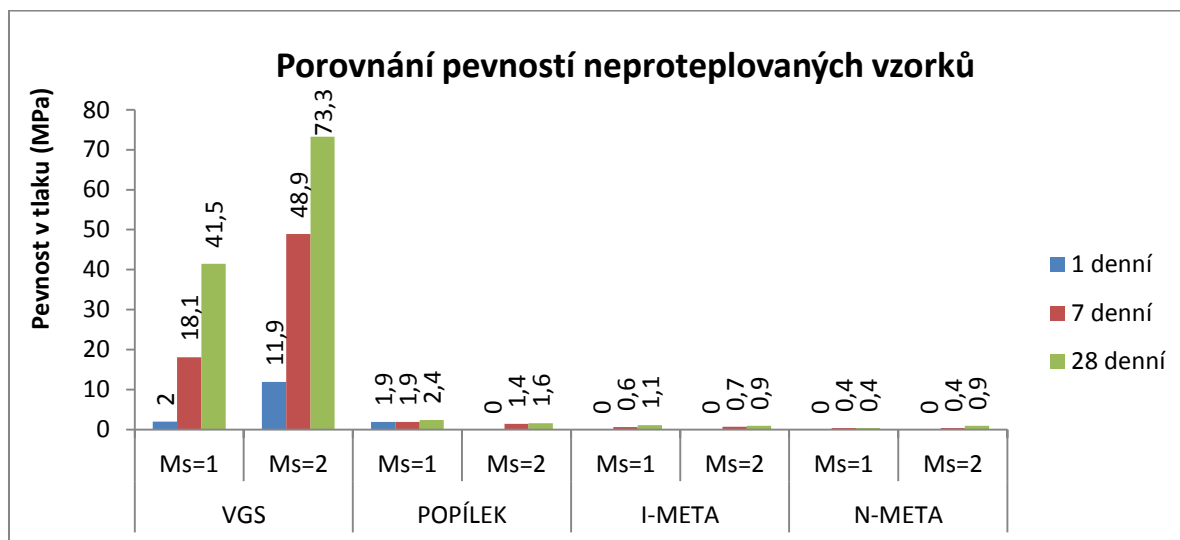


Obr. 47: Srovnání pevností v tahu za ohybu u proteplovaných vzorků

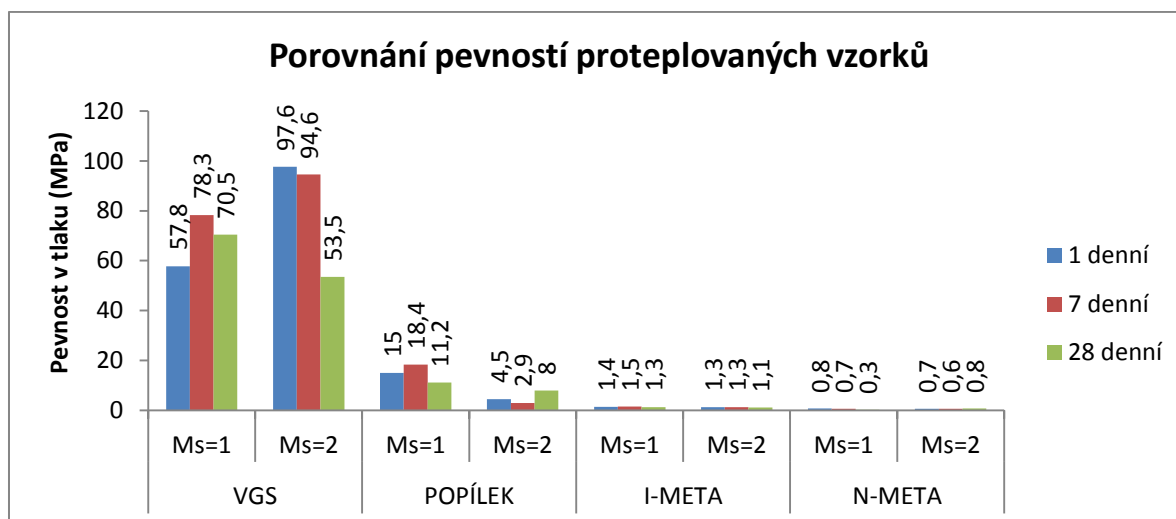
Proteptované vzorky vykazují vyšší počáteční pevnosti v tahu za ohybu u pěti vzorků. Vysokopecní granulovaná struska a popílek Dětmárovice dosahuje vždy vyšších počátečních pevností u proteptovaných vzorků.

5.9.8 Porovnání pevností v tlaku

Grafická porovnání pevností v tlaku neproteptovaných a proteptovaných vzorků jednotlivých směsí po 1, 7 a 28 dnech hydratace u těles s různým $M_s = 1$ a $M_s = 2$ jsou uvedena na Obr. 48 a 49.



Obr. 48: Graf pevností v tlaku neproteptovaných vzorků



Obr. 49: Graf pevností v tlaku neprotepovaných vzorků

Proteplované vzorky vykazují vždy vyšší počáteční pevnosti v tlaku. Nejvyšší počáteční pevnosti v tlaku dosáhla vysokopecní granulovaná struska se silikátovým modulem $Ms = 2$, kdy dosáhla hodnoty pevnosti 97,6 MPa. Tato hodnota je více než osmkrát vyšší než pevnost neprotepovaného vzorku po jednom dni. Vysokopecní granulovaná struska aktivovaná silikátovým modulem $Ms = 1$ prokázala při protepování také velký nárůst počátečních pevností, kdy tento nárůst byl více než 25 násobkem počáteční pevnosti neprotepované směsi. Protepování se tedy ukázalo jako vhodné ve všech případech požadovaného rychlého nárůstu počátečních pevností. Konečné pevnosti ve většině případů u protepovaných směsí však naznačují značný pokles oproti hodnotám neprotepovaných vzorků. Nejvyšší, až 45 % pokles byl zaznamenán u vysokopecní granulované strusky aktivované silikátovým modulem $Ms = 2$ po 28 dnech zrání. Negativní vliv na vývoj dlouhodobých pevností nebyl zaznamenán u směsi s popílkem Dětmarovice a silikátovým modulem $Ms = 2$.

5.9.9 Možná uplatnění připravených receptur ve stavebnictví

U připravených receptur bylo prokázáno, že zatím je nejlepších výsledků dosahováno u směsí připravených na bázi vysokopecní granulované strusky. Výsledky jsou, i v porovnání se zdroji, z nichž jsem při zpracování této práce čerpal, víceméně stabilní, tedy že nedochází u jednotlivých typů výzkumů k výrazným výkyvům ve výsledcích tak, jak je tomu u systémů připravených alkalickou aktivací metakaolinů a popílků. Například v rámci výzkumu popílkového betonu [18] jsou dosahovány pevnosti v tlaku cca 60 MPa, v této práci se maximální hodnoty pevností pohybovaly u tohoto druhu materiálu na úrovni 15 – 18 MPa. Tato nestejnorodost výsledků je samozřejmě ovlivněna mnoha faktory, nicméně pro současné stavebnictví jsou takto nehomogenní výsledky prakticky nepoužitelné a je nutno se výzkumem jejich vlastností dále zabývat. [1]

Pro praktické aplikace ve stavebním průmyslu bych tedy osobně doporučoval zatím volit pouze alkalicky aktivované kompozity na bázi vysokopecní jemně mleté granulované strusky, u kterých bylo dosahováno stabilních a v porovnání s podobnými výzkumy srovnatelných výsledků. Vzhledem k pevnostem a ověřené vysoké odolnosti proti agresivním vlivům prostředí je možno tyto systémy použít v podstatě všude tam, kde jsou požadovány vysoké pevnosti, tedy pro veškeré nosné konstrukce, případně odolnost proti vnějším vlivům pro stavby v extrémních teplotních a korozivních podmínkách, kde není možno používat tradiční cementové betony. [1]

6. Závěr

Cílem bakalářské práce byla příprava a ověření vlastností alkalicky aktivovaných materiálu na bázi vysokopecní granulované strusky, popílku Dětmárovice a metakaolinu N-META a I-META, které při práci sloužily jako pojiva. Experimentální práce probíhala od listopadu 2013 do dubna 2014. Tato práce byla rozdělena do tří etap.

První etapa se zabývala určením vhodného složení jednotlivých receptur, kdy sjednocujícím kritériem bylo rozlité směsi při stanovení konzistence, jež se pohybovalo v rozmezí 120 – 140 mm. Do této etapy patřilo rovněž stanovení počátků a konců dob tuhnutí.

Ve druhé fázi byly zkoušeny neproteplovaná i proteplovaná tělesa na pevnosti v tahu ohybem a v tlaku, stanoveny byly průměrné objemové hmotnosti. V závěru byla provedena také zkouška mrazuvzdornosti.

Poslední fází bylo grafické znázornění a vyhodnocení získaných výsledků.

Prokázán byl pozitivní vliv proteplování na nárůst počátečních pevností především u systémů na bázi vysokopecní strusky a popílku, u metakaolinů nebyl tento trend vzhledem k minimálním dosaženým hodnotám zřetelný. Proteplováním bylo dosaženo rychlého nárůstu počátečních pevností, což je nejvýraznější u těles s vysokopecní struskou, nicméně je nutné také konstatovat, že následné pevnosti, zejména po 28 dnech zrání, byly výrazně nižší, než u těles neproteplovaných. Jako vhodné se jeví proteplování těles na bázi popílku.

U těles připravených s aktivátorem o silikátovém modulu 1 byl rychlejší nástup počátku tuhnutí, pozitivním směrem se pak nejvýrazněji nižší silikátový modul projevil u pevností směsí s popílkem.

Mrazuvzdornost byla ověřována na proteplovaných i neproteplovaných tělesech, bohužel u většiny z nich došlo k totální destrukci již v prvních cyklech zmrazování, hodnoty byly měřitelné pouze u neproteplovaných těles na bázi vysokopecní strusky, kde se součinitel mrazuvzdornosti pohyboval v rozmezí 0,91 – 1 a u proteplovaných těles byla prokázána mrazuvzdornost po 80 cyklech zkoušky u vysokopecní strusky (součinitel mrazuvzdornosti 0,91 – 0,95), u popílku byl zjištěn součinitel mrazuvzdornosti jen 0,59.

Závěrem lze konstatovat, že obecně nejlepších výsledků je dosahováno u systémů na bázi vysokopecní strusky, kde se teploty v tlaku pohybují až na úrovni 100 MPa, kdy tyto

systemy jsou rovněž vysoce odolné vůči působení mrazu. K dalšímu výzkumu v oblasti alkalicky aktivovaných systémů lze doporučit hledání optimálního poměru kombinace vysokopevní strusky a ostatních latentně hydraulických pojiv.

7. Poděkování

Rád bych poděkoval mojí vedoucí bakalářské práce Ing. Janě Boháčové za konzultace, cenné rady a pomoc při práci. Poté bych chtěl poděkovat celé Katedře stavebních hmot a diagnostiky staveb za hmotnou pomoc při experimentální práci.

Mé poděkování patří také Laboratoři tepelných vlastností, reologie a koroze stavebních materiálů, kterou jsem v práci využíval.

8. Použitá literatura

- [1] BOHÁČOVÁ, J. *Příprava a ověření vlastností geopolymérů na bázi metakaolínu a dalšího pojiva*. Ostrava, 2009. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [2] ČSN 72 2452. *Zkouška mrazuvzdornosti malty*. Praha: Český normalizační institut, 1970.
- [3] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo: Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím stráscacího stolku)*. Český normalizační institut, 2000.
- [4] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu: Část 1: Stanovení pevnosti*. Český normalizační institut, 2005.
- [6] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu: stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
- [7] DAVIDOVITS, J. *Nové dějiny pyramid: první globálně pojatá teorie o stavbě pyramid vycházející ze syntézy moderní vědy, experimentování, náboženství a hieroglyfických textů*. Olomouc: Fontána, 2006. ISBN 80-733-6341-0.
- [8] ECKL, O. *Využití některých velkoobjemově produkováných druhotných surovin k přípravě pojiv a kompozitu na bázi geopolyméru*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] JIRÁSEK, J. a VAVRO, M. *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3.
- [10] Kolektiv autorů. *Současný stav výzkumu v oblasti geopolymérů*. Praha: Česká rozvojová agentura o.p.s., 2005.
- [11] NAVRÁTILOVÁ, E., STRÁDAL, J. a ROVNANÍKOVÁ, P. Cementové malty modifikované cihelným recyklátem. In: *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference*,

CzechSTAV 2012 – Trendy ve stavebnictví. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012. s. 242-247. ISBN: 978-80-905243-1-6.

[12] OVČAŘÍKOVÁ, H. *Příprava pojiv alkalickou aktivací alternativních surovin*. Ostrava, 2011. Souhrn disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

[13] RŮŽIČKOVÁ, Z., SRB, J. a VIDLÁŘ, J. *Druhotné suroviny - nové zdroje průmyslu*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Knižnice technických aktualit. ISBN 80-030-0020-3.

[14] SLIVKA, V. *Průmyslové odpady a možnosti jejich využití jako druhotné suroviny pro sanaci po báňské činnosti*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0110-8.

[15] SLIVKA, V. *Těžba a úprava silikátových surovin*. Praha: Silikátový svaz, 2002. ISBN 80-903-1130-X.

[16] SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.

[17] ŠRÁMKOVÁ, E. *Příprava historických geopolymerů*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[18] TIŠLEROVÁ, L. *Využití alkalicky aktivovaných betonů u malých mostních objektů integrovaných mostů*. Pardubice, 2012. Disertační práce. Univerzita Pardubice dopravní fakulta Jana Pernera.

[19] VLČEK, J. *Materiálové využití strusek z metalurgie železa a oceli metodou alkalické aktivace*. Ostrava, 2008. Habilitační práce. MS FMMI Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

Elektronické dokumenty

[20] HANUŠ, V. a kolektiv: *Vliv současných chemických příměsí a přísad na výsledné vlastnosti betonu* [online]. Fond rozvoje vysokých škol, 2012 [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS_2012_prisady_primesy.pdf

[21] PETRÁNEK, J. *Geologická encyklopedie* [online]. Česká geologická služba, © 2007 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>

- [22] SEDLECKÝ KAOLIN A.S. *Metakaolin* [online]. Sedlecký kaolin a.s., © 2008 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.sedlecky-kaolin.cz/cz/ke-stazeni/download/technick%E9%20listy/Metakaolin.pdf>
- [23] ŠKVÁRA, F. *Alkalicky aktivované materiály geopolymery* [online]. Ústav skla a keramiky. VŠCHT v Praze, © 2001-2005 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [24] ŠKVÁRA, F., SVOBODA, P., DOLEŽAL, J., BITTNAR, Z., ŠMILAUER, V., KOPECKÝ, L., ŠULC, R. *Geopolymerní beton (také starověký materiál?)* [online]. Praha [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/sil/pojiva/Geopolymerni_beton_starovek.pdf
- [25] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Ústav průmyslové keramiky* [online]. VŠB-TU Ostrava, © 2014 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.fmmi.vsb.cz/cs/katedry-a-pracoviste/635/ustav-prumyslove-keramiky/>
- [26] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO - TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. Ústav skla a keramiky. *Laboratoř anorganických pojiv* [online]. Ústav skla a keramiky, © 2001-2009 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: http://tresen.vscht.cz/sil/cs/skupina_pojiva

9. Seznam obrázků

Obr. 1: Laboratorní míchačka Beton Systém MI - CMA

Obr. 2: Zkušební zařízení pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu

Obr. 3: Zkušební zařízení pro zkoušku pevnosti v tlaku

Obr. 4: Vzorek tělesa z metakaolinu N-META

Obr. 5: Vzhled těles z popílku a odloupnutí vnější části

Obr. 6: Vzhled těles z vysokopecní granulované strusky

Obr. 7: Vzhled těles z metakaolinu I-META

Obr. 8: Vzhled těles z metakaolinu N-META

Obr. 9: Struktura těles z metakaolinu I-META před zkouškou 7 denních pevností

Obr. 10: Výskyt trhlin u těles z metakaolinu N-META před zkouškou 7 denních pevností

Obr. 11: Odloupnutí povrchové vrstvy u těles z popílku Dětmarovice před zkouškou 7 denních pevností

Obr. 12: Vzhled těles z vysokopecní granulované strusky před zkouškou 7 denních pevností

Obr. 13: Vzhled těles z vysokopecní granulované strusky po zkoušce pevnosti v tahu ohybem

Obr. 14: Vzhled těles z popílku po zkoušce pevnosti v tahu ohybem

Obr. 15: Vzhled těles z metakaolinu I-META po zkoušce pevnosti v tahu ohybem

Obr. 16: Vzhled těles z metakaolinu N-META po zkoušce pevnosti v tahu ohybem

Obr. 17: Vzhled proteplováných vzorků N-META před zkouškou 28 denních pevností

Obr. 18: Vzhled proteplováných vzorků vysokopecní granulované strusky před zkouškou 28 denních pevností

Obr. 19: Vzhled proteplováných vzorků popílku Dětmarovice před zkouškou 28 denních pevností

Obr. 20: Vzhled proteplováných vzorků I-META před zkouškou 28 denních pevností

Obr. 21: Vzhled proteplováných vzorků I-META po zkoušce pevnosti v tahu ohybem po 28 denních hydrataci

Obr. 22: Porušení neproteplováných vzorků vlivem zmrazování a rozmrazování

Obr. 23: Porušení proteplováných vzorků vlivem zmrazování a rozmrazování

Obr. 24: Porušení vzorku vysokopecní granulované strusky $M_s = 1$

Obr. 25: Neporušený vzorek vysokopecní granulované strusky $M_s = 2$

Obr. 26: Graf nárůstu pevností v tlaku těles ($M_s = 1$) neproteplováných vzorků

Obr. 27: Graf nárůstu pevností v tlaku těles ($M_s = 2$) neproteplováných vzorků

Obr. 28: Vývoj pevností v tlaku proteplováných vzorků ($M_s = 1$)

Obr. 29: Vývoj pevností proteplováných vzorků ($M_s = 2$)

Obr. 30: Vývoj pevností v tahu za ohybu neproteplováných vzorků ($M_s = 1$)

Obr. 31: Graf nárůstu pevností v tahu za ohybu neproteplováných vzorků ($M_s = 2$)

Obr. 32: Graf vývoje pevností v tahu za ohybu proteplováných vzorků ($M_s = 1$)

Obr. 33: Graf vývoje pevností v tahu za ohybu proteplováných vzorků ($M_s = 2$)

Obr. 34: Graf pevností neproteplováných vzorků v tahu za ohybu po 1 dnu hydratace

Obr. 35: Graf pevností proteplováných vzorků v tahu za ohybu po 1 dnu hydratace

Obr. 36: Graf pevností neproteplováných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace

Obr. 37: Graf pevností proteplováných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace

Obr. 38: Graf pevností neproteplováných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace

Obr. 39: Graf pevností proteplováných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace

Obr. 40: Graf pevností neproteplováných vzorků v tlaku po 1 dnu hydratace

Obr. 41: Graf pevností proteplováných vzorků v tlaku po 1 dnu hydratace

Obr. 42: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace

Obr. 43: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 7 dnech hydratace

Obr. 44: Graf pevností neproteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace

Obr. 45: Graf pevností proteplovaných vzorků v tahu za ohybu po 28 dnech hydratace

Obr. 46: Srovnání pevností v tahu za ohybu u neproteplovaných vzorků

Obr. 47: Srovnání pevností v tahu za ohybu u proteplovaných vzorků

Obr. 48: Graf pevností v tlaku neproteplovaných vzorků

Obr. 49: Graf pevností v tlaku neproteplovaných vzorků

10. Seznam tabulek

Tab. 1. Rudy pro výrobu železa

Tab. 2. Procentuální zastoupení jednotlivých oxidů v popílku Dětmárovice

Tab. 3. Procentuální zastoupení oxidů v jednotlivých metakaolinech

Tab. 4. Základní parametry metakaolinů

Tab. 5. Procentuální zastoupení oxidů ve vysokopecní granulované strusce

Tab. 6. Základní složení směsí

Tab. 7. Množství záměsové vody jednotlivých směsí

Tab. 8. Výsledné složení připravovaných směsí

Tab. 9. Počátky a konce dob tuhnutí směsí [min.]

Tab. 10. Objemové hmotnosti neproteplováných směsí

Tab. 11. Objemové hmotnosti proteplováných směsí

Tab. 12. Vlastnosti neproteplováných vzorků po 1 dnu hydratace

Tab. 13. Vlastnosti proteplováných směsí po 1 dnu hydratace

Tab. 14. Vlastnosti neproteplováných směsí po 7 dnech hydratace

Tab. 15. Vlastnosti proteplováných těles po 7 dnech hydratace

Tab. 16. Naměřené hodnoty u směsí po 28 dnech hydratace

Tab. 17. Naměřené hodnoty proteplováných směsí po 28 dnech hydratace

Tab. 18. Mrazuvzdornost neproteplováných vzorků po 100 cyklech zkoušky

Tab. 19. Mrazuvzdornost proteplováných vzorků po 80 cyklech zkoušky

Tab. 20. Vstupní údaje grafického vyhodnocení neproteplováných vzorků ($M_s = 1$)

Tab. 21. Vstupní údaje grafického vyhodnocení neproteplováných vzorků ($M_s = 2$)

Tab. 22. Vstupní údaje grafického vyhodnocení protěplovaných vzorků ($M_s = 1$)

Tab. 23. Vstupní údaje grafického vyhodnocení protěplovaných vzorků ($M_s = 2$)

Tab. 24. Vstupní údaje grafického vyhodnocení nepřetěplovaných vzorků ($M_s = 1$)

Tab. 25. Vstupní údaje grafického vyhodnocení nepřetěplovaných vzorků ($M_s = 2$)

Tab. 26. Vstupní údaje grafického vyhodnocení protěplovaných vzorků $M_s = 1$

Tab. 27. Vstupní údaje grafického vyhodnocení protěplovaných vzorků ($M_s = 2$)

11. Seznam příloh

Příloha 1	Technický list metakaolinu I-META 4
Příloha 2	Technický list metakaolinu N-META 4
Příloha 3	Technický list vysokopecní granulované strusky Příloha
Příloha 4	Materiálový list technického hydroxidu sodného
Příloha 5	Technický list vodního skla



TECHNICKÝ LIST

METAKAOLIN I META 4

surovina pro chemický a stavební průmysl

Výrobce a dodavatel :
 Sedlecký kaolín s.r.o. Fax: +420 / 353 366 112
 362 26 Božichany Tel: +420 / 353 366 111
 Czech Republic E-mail: info@sedlecky-kaolin.cz
<http://www.sedlecky-kaolin.cz>

TECHNICKÉ PARAMETRY

Parametr	hodnota	rozsah	
barva	oranžová-červená		(bíllost ISO457 : 45-65%)
olejové čislo	67		g/100 g, standardní olej
zpracovatelnost	155	140-250	mm, míra rozptřeni
typná váha	380	350-450	kg/m ³
vlhkost	0,5		%, sušení při 105°C

Granulometrie (Sedigraph, Laser granulometer)

podíl < 2 µm	54 %		sedimentační metoda
částice D ₅₀	2,8 µm		ditto
částice D ₉₀	4 µm	3,5-4,5	laserový granulometr
částice D ₉₅	13 µm	10-25	ditto

chemické složení %

ztr. žháním	1,8	1-3	analytická metoda :
SiO ₂	52		Rtg-fluorescenční analýza
Al ₂ O ₃	41	38-42	kališnice mazinár, standardy
Fe ₂ O ₃	1,9	1,7-2,5	
TiO ₂	0,3		
H ₂ O	0,3		
CaO	0,3		
K ₂ O	1,6		
Na ₂ O	0,01		

Systém řízení jakosti ve společnosti je
certifikován podle normy ISO 9001:2000



Výrobní závod : CZ-362 26 Božichany

Balení : obří vaky 250 / 500 / 1000 kg

Garantované parametry produktu a podmínky dodávek jsou předmětem jednání

	TECHNICKÝ LIST	
	METAKAOLIN N META 4	
	surovina pro stavební a chemický průmysl	
	Výrobce a dodavatel :	
	Sedlecký kaolin a.s. 362 26 Božičany Czech Republic	Fax +420 / 353 366 112 Tel. +420 / 353 366 111 E-mail : info@sedlecky-kaolin.cz http://www.sedlecky-kaolin.cz

TECHNICKÉ PARAMETRY

Parametr	hodnota	rozmezí	
bělost	86	80-90	%, ISO 457
olejové číslo	63		g/100 g, standardní olej
sypaná váha	380	350-450	kg/m ³
vlhkost	0,5		%, sušení při at 105°C

Granulometrie (Sedigraph, Laser granulometer)

podíl < 2 µm	41 %		sedimentační metoda
částice D ₅₀	2,8 µm		ditto
částice D ₉₀	4 µm	3,5-4,5	laserový granulometr
částice D ₉₅	13 µm	10-25	ditto

chemické složení %

ztr. žehárním	0,5	0,5-2	analytická metoda : Rtg-fluorescenční analýza kalibrace mezinár. standardy
SiO ₂	54		
Al ₂ O ₃	43	40-44	
Fe ₂ O ₃	0,9	0,8-1,1	
TiO ₂	0,6		
MgO	0,3		
CaO	0,3		
K ₂ O	0,5		
Na ₂ O	0,01		

Systém řízení jakosti ve společnosti je
certifikován podle normy ISO 9001:2000



Výrobní závod : CZ-362 26 Božičany

Balení : obří vaky 250 / 500 / 1000 kg

Garantované parametry produktu a podmínky dodávek jsou předmětem jednání



Struska velmi jemně mletá

Technické parametry:

SMŠ dle PN SMŠ 72 20 90	SMŠ dle XYZ m ² /kg
Typ výrobku, přidat	SMŠ 400
Měrný povrch dle Blaine	≥ 400 m ² /kg
Zbytek na síti 45 μm	≤ 4,5%
Index účinnosti po 7 dnech *	≥ 50 %
Index účinnosti po 28 dnech *	≥ 80 %
Objemová zlůta dle Le Chatellera	< 10 mm
Obsah chloridů	≤ 0,1 %

* *parametr (SMŠ) vyjádřený v síle normalizovaných válečků z malty připravené ze 50 % hmotnosti referenčního cementu a 50 % hmotnosti SMŠ, kypřené v síle normalizovaných válečků z malty připravené jen ze samotného referenčního cementu dle ČSN EN 196-1.*

Chemické vlastnosti:

Struska mletá	m.j.	PN 72 2090	dosahované průměrné skutečnosti
CaO	%	26 – 43	40,0
MgO	%	4 – 13	8,9
SiO ₂	%	28 – 43	39,9
Al ₂ O ₃	%	4 – 12	6,9
Fe ₂ O ₃	%	< 1,5	0,4
SO ₃	%	≤ 1,5	0,6
(CaO + MgO)/SiO ₂	%	≥ 1,0	1,2

Objednávky, informace: KOTOUČ STRAMBERK, spol. s r.o., Libetín 500, 742 66 Stramberk
tel.: 556 873 582-3 ; fax: 556 873 581 ; e-mail: obchod@kotouc.cz

Vytvářeno a tištěno prostřednictvím vývojového systému výrobce, který je součástí technické dokumentace. Tiskové vyjádření slouží pouze jako pomocná informace a není závazné. Všechny údaje jsou ověřeny a platí od 1.1.2013.

	HYDROXID SODNÝ TECHNICKÝ
-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------

CAS 1310-73-2

Číslo ES 215-185-5

CHARAKTERISTIKA

Hydroxid sodný technický je čirá bezbarvá viskózní kapalina, někdy slabě zakalená, bez obsahu mechanických nečistot. Snadno se rozpouští ve vodě a v alkoholu. Při styku s vodou se silně zahřívá. Má silně alkalickou reakci.

Hydroxid sodný je látkou žravou ve smyslu zákona č. 356/2003 Sb. Pozor, způsobuje těžké poleptání! Při práci a jakékoliv manipulaci s ním je nezbytné dodržovat předpisy o bezpečnosti a ochraně zdraví uvedené v kapitole VI. této normy a v příslušném bezpečnostním listu.

Výrobek je vyráběn podle platné technologické, požární a bezpečnostní dokumentace.

TECHNICKÉ POŽADAVKY

Hodnota	Znak jakosti	Zkouší se podle článku č.
Celková alkalita (jako NaOH) v %, mín. Total alkalinity (as NaOH) in %, min.	49,0	9
Uhličitan sodný (Na_2CO_3) v %, max. Sodium carbonate (Na_2CO_3) in %, max.	0,2	9
Chloridy (NaCl) v %, max. Chloride (NaCl) in %, max. (tj. chloridy (Cl^-) v mg.kg^{-1})	0,017*) (103)	10, 11
Železo (Fe) v %, max. Iron (Fe) in %, max.	0,0005*)	12

*) Parametr zkoušen s využitím redukované kontroly. Deklarovanou úroveň jakostního parametru výrobce zaručuje, naměřená hodnota nemusí být součástí osvědčení o jakosti (atestu).

Č. vyřizku / č. revize	Nahrazuje Materiálový list ze dne :	Účinnost od :	Strana 1 z 1
1	1.3.2000	1.2.2005	

Ol 29.4.2014 10:17 odp.



KITTFORT PRAHA
Horňátky 1
277 11 Neratovice

VODNÍ SKLO

PN:KT•B•17•01•09

Název výrobku
Vodní sklo

Složení
Vodní sklo sodné 36-38, křemičitá kyselina, sodná sůl

Odstín
Našedlá až načervenalá kapalina

Použití
Vodní sklo se používá ke konzervaci vajec nebo jako pojivo do žáruvzdorných malt a tmelů

Dávkování
Konzervace vajec: 1 díl vodního skla + 9 dílů převařené vody. Na láhev o obsahu 5 litrů (50 ks vajec) stačí 2,5 litrů roztoku. Čistá omytá vejce vložíme do láhve a zalijeme roztokem.
Pojivo do žáruvzdorných malt a tmelů: Rudokitt® univerzální žáruvzdorný tmel vodní sklo s vodou v poměru 2:1
Šamotová výmazová hmota-přibližně 2 polévkové lžice na 1 kg šamotové hmoty

Bezpečnost a ochrana zdraví
KLASIFIKACE: Xi • dráždivý

První pomoc
Při nadýchání: za běžné teploty má látka nízkou tenzi par. Pokud při nadýchání způsobí nepříznivé účinky, přesunout postiženého do nekontaminovaného prostředí. Vyhledat lékaře.
Při požití: při náhodném požití vypít asi půl litru vody nebo mléka a do 5 minut po požití vyvolat zvracení. Později zvracení nevyvolávat.
Při zasažení kůže: odložit kontaminovaný oděv a kůži omýt velkým množstvím vody.
Při zasažení očí: zasažené oko vyplachovat proudem vodou

Vzhled
kapalina našedlá až načervenalá

Balení
500ml, 1l, 5l

Záruční doba: 18 měsíců od data plnění uvedeného na obalu.